

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Kompenzace zemních spojení ve vn sítích
Earth Fault Compensation in MV Network

2018

Zdenek Rajnoch

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání bakalářské práce

Student: **Zdenek Rajnoch**
Studijní program: **B2649 Elektrotechnika**
Studijní obor: **3907R001 Elektroenergetika**
Téma: **Kompenzace zemních spojení ve vn sítích.
Earth fault compensation in MV network.**
Jazyk vypracování: **čeština**

Zásady pro vypracování:

1. Popis kabelových i venkovních sítí nn a vn
2. Teoretický rozbor vzniku jednopólových poruch
3. Možnosti kompenzace zemních kapacitních proudů
4. Možnosti lokalizace místa zemního spojení
5. Příklad výpočtu

Seznam doporučené odborné literatury:

1. Santarius, P.: Elektrické stanice a vedení, Skripta VŠB-TU Ostrava, 1990
2. Hodinka, M.: Přenos a rozvod elektrické energie, SNTL, 1989
3. Trojánek, Z.: Přechodné jevy v elektrizačních soustavách, SNTL 1987
4. Dohnálek, P.: Ochrany pro průmysl a energetiku, SNTL, 1991
5. Toman, P.: Lokalizace místa zemního spojení v sítích VN, Brno, 2002

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Dr. Ing. Jiří Gurecký**

Datum zadání: 01.09.2017

Datum odevzdání: 30.04.2018

prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry



prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

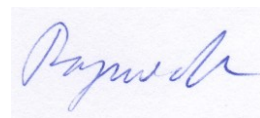
Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

Poděkování:

Tímto bych chtěl poděkovat doc. Dr. Ing. Jiřímu Gureckému za odborné konzultace a pomoc při vypracování bakalářské práce.

Odevzdání: 30. 4. 2018



Zdenek Rajnoch

Abstrakt

Tato bakalářské práce se zabývá zemním spojením. Na začátek jsou zde vysvětleny základní parametry vedení, popsány venkovní a kabelové sítě, uvedeny typy rozvodných sítí a materiály na výrobu vodičů. Tato práce se dále zabývá vznikem zemního spojení a jeho rozdělením. Následně jsou uvedeny způsoby kompenzace zemního spojení a jeho lokalizace. V poslední části je zpracován návrh kompenzační tlumivky.

Abstract

Subject of this bachelor thesis is earth fault. At the beginning of the thesis is explained basic parameters of power line, describes outdoor network and cable network, types of distribution networks and material for the manufacturing of conductors. The thesis describes beginning of earth fault and his kinds. Thesis contains methods of compensation of earth faults and his localization. In the last part of thesis contains a proposal of compensation choke.

Klíčová slova

Elektrické parametry, zemní spojení, kompenzace zemního spojení, lokalizace zemního spojení

Key words

Electrical parameters, ground fault, earth fault compensation, earth fault localization

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	6
SEZNAM ILUSTRACÍ.....	8
ÚVOD	9
1. POPIS KABELOVÝCH A VENKOVNÍCH SÍTÍ NN A VN ...	10
1.1 Parametry vodiče.....	10
1.2 Hladiny napětí	13
1.3 Silové elektrické vedení	14
1.4 Rozdělení rozvodných sítí TN, TT, IT	14
1.5 Materiály vodičů	18
2. TEORETICKÝ ROZBOR VZNIKU ZEMNÍHO SPOJENÍ ...	20
2.1 Rozdělení zemních spojení.....	20
2.2 Trvalá zemní spojení	21
2.3 Přerušované zemní spojení	24
3. Možnosti kompenzace zemních kapacitních proudů.....	30
3.1 Síť s nepřímo uzemněným uzlem přes zhášecí tlumivku (Petersonovu cívku)	30
3.2 Síť s nepřímo uzemněným uzlem přes odpor	33
3.3 Síť s přechodným uzemněním uzlu	35
3.4 Švédská neutrála (Swedish neutral).....	35
4. MOŽNOSTI LOKALIZACE MÍSTA ZEMNÍHO SPOJENÍ .	37
4.1 Lokalizace místa zemního spojení postupným vypínáním úseků	37
4.2 Lokalizace zemního spojení užitím indikátorů	38
4.3 Lokalizace zemního spojení kontrolou údržby	38
4.4 Lokalizace zemního spojení pomocí zkruhování sítě	38
4.5 Lokalizace místa zemního spojení s využitím napěťového kritéria	38
4.6 Lokalizace místa zemního spojení s využitím proudového kritéria	39
5. NÁVRH KOMPENZAČNÍ TLUMIVKY	42
ZÁVĚR	47
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	48

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

C	celkové kapacita vztažená k zemi	(F)
C_A	kapacita fáze A k zemi	(F)
C_B	kapacita fáze B k zemi	(F)
C_C	kapacita fáze C k zemi	(F)
C_{AB}	kapacita mezi fází A a B	(F)
C_{AC}	kapacita mezi fází A a C	(F)
C_{BC}	kapacita mezi fází B a C	(F)
D_{12^*}	vzdálenost mezi fází 1 a obrazem fáze 2	(m)
D_{13^*}	vzdálenost mezi fází 1 a obrazem fáze 3	(m)
D_{23^*}	vzdálenost mezi fází 2 a obrazem fáze 3	(m)
D_S	střední vzdálenost od obrazu	(m)
E	indukované elektromagnetické napětí alternátoru	(V)
G	svodová vodivost	(S)
I	elektrický proud	(A)
I_A	elektrický proud fáze A	(A)
I_B	elektrický proud fáze B	(A)
I_C	elektrický proud fáze C	(A)
I_1	fázor proudu sousledné složkové soustavy	
I_2	fázor proudu zpětné složkové soustavy	
I_0	fázor proudu netočivé složkové soustavy	
I_{kap}	proud kapacitní	(A)
I_L	proud tlumivky	(A)
I_R	proud tekoucí rezistorem	(A)
L	indukčnost	(H)
N	střední pracovní vodič	
P	činný výkon	(W)
PE	ochranný vodič	
PEN	ochranný a střední pracovní vodič spojené dohromady	
Q	jalový výkon	(VAr)
R	odpor rezistoru	(Ω)
R_L	odpor tlumivky	(Ω)
S	zdánlivý výkon	(VA)
U_A	elektrické napětí fáze A	(V)
U_B	elektrické napětí fáze B	(V)
U_C	elektrické napětí fáze C	(V)
U_f	elektrické napětí fázové	(V)
U_0	napětí uzlu vůči zemi	(V)
U	elektivní hodnota fázového napětí	(V)
U_S	sdružené napětí	(V)
X_C	kapacitní reaktance vedení	(Ω)
Z_{C1}	celková impedance sousledné složkové soustavy	(Ω)
Z_{C2}	celková impedance zpětné složkové soustavy	(Ω)

Z_{C0}	celková impedance netočivé složkové soustavy	(Ω)
d_1	průměr lana AlFe 6 70 mm ²	(m)
d_2	průměr lana AlFe 6 95 mm ²	(m)
d_{12}	vzdálenost fází 1 a 2	(m)
d_{13}	vzdálenost fází 1 a 3	(m)
d_{23}	vzdálenost fází 2 a 3	(m)
d_s	střední vzdálenost vodičů	(m)
j	imaginární jednotka	
k_o	kapacita proti zemi	(F)
mn	malé napětí	
nn	nízké napětí	
r_1	poloměr lana AlFe 6 70 mm ²	(m)
r_2	poloměr lana AlFe 6 95 mm ²	(m)
u_m	amplituda sinusovky napětí, velikost rotujícího fázoru napětí	
u _{vn}	ultra vysoké napětí	
vn	vysoké napětí	
v _{vn}	velmi vysoké napětí	
z _{vn}	zvláště vysoké napětí	
ω	úhlová rychlost	(rad/s)

SEZNAM ILUSTRACÍ

Obr. 1.1 Obvodové schéma elementu vedení	10
Obr. 1.2 Síť TN-S.....	15
Obr. 1.3 Síť TN-C	15
Obr. 1.4 Síť TN-C-S.....	16
Obr. 1.5 Síť TT.....	17
Obr. 1.6 Síť TN-S.....	17
Obr. 2.1 Schematické znázornění zemního spojení	21
Obr. 2.2 Propojení náhradních schémat složkových soustav při zemním spojení při zanedbání indukčních reaktancí článků ES	22
Obr. 2.3 Fázorový diagram proudů při trvalém zemním spojení	23
Obr. 2.4 Fázorový diagram napětí při trvalém zemním spojení.....	23
Obr. 2.5 Schéma sítě s izolovaným uzlem při chodu se zemním spojením.....	24
Obr. 2.6 Náhradní schéma ES při uzemnění fáze A	25
Obr. 2.7 Náhradní schéma ES pro okamžik vzniku zemního spojení	25
Obr. 2.8 Průběh napětí při vzniku zemního spojení.....	26
Obr. 2.9 Průběh napětí při přerušovaném zemním spojení (podle teorie Petersena).....	28
Obr. 2.10 Průběh napětí při přerušovaném zemním spojení (podle teorie Peterse a Slepiana)	29
Obr. 3.1 Činnost zhášecí tlumivky	30
Obr. 3.2 Princip kompenzace zemního proudu.....	32
Obr. 3.3 Fázorový diagram se zbytkovým proudem.....	32
Obr. 3.4 Činný odpor v uzlu trojfázové sítě.....	33
Obr. 3.5 Fázorový diagram při zemní poruše v blízkosti transformátoru	34
Obr. 3.6 Schéma sítě s přechodným uzemněním uzlu	35
Obr. 3.7 Toleranční pole monitorování sítě systémem Swedish Neutral	36
Obr. 4.1 Napětí na uzlu transformátoru při zemním spojení.....	38
Obr. 4.2 Připojení ochrany na otevřený trojúhelník.....	39
Obr. 4.3 Zemní ochrana sítě s izolovaným bodem se zemním proudem $I_{CS} \gg I_{CV}$	40
Obr. 4.4 Zemní ochrana sítě s izolovaným bodem se zemním proudem $I_{CS} \approx I_{CV}$	40
Obr. 5.1 Schéma zapojení.....	42
Obr. 5.2 Stožár typu 1	43
Obr. 5.3 Stožár typu 2	43

ÚVOD

Distribuční soustava, jedna z částí elektrizační soustavy, slouží pro dodávku elektrické energie ke spotřebitelům, jako jsou obce, města a průmysl. K přenosu se používají nadzemní i podzemní vedení vysokého napětí. Z důvodu zajištění vyšší spolehlivosti dodávky elektrické energie nemají sítě vysokého napětí uzel transformátoru přímo uzemněn.

Nejčastějším typem poruchy v sítích s nepřímo uzemněným nebo izolovaným uzlem je jednofázová porucha nazvaná zemní spojení. Poruchový proud procházející místem poruchy je malý a síť není třeba vypínat. V určitých situacích může dosahovat větších hodnot a při zemním spojení může dojít k zapálení elektrického oblouku, který by napáchal značné škody. Z tohoto důvodu je třeba provádět kompenzaci, aby došlo ke snížení poruchového proudu a nemohlo dojít k zapálení oblouku. Kromě toho je potřeba umět zemní spojení v rozsáhlé síti lokalizovat, aby byl zajištěn spolehlivý a bezpečný provoz sítě.

1. POPIS KABELOVÝCH A VENKOVNÍCH SÍTÍ NN A VN

1.1 Parametry vodiče

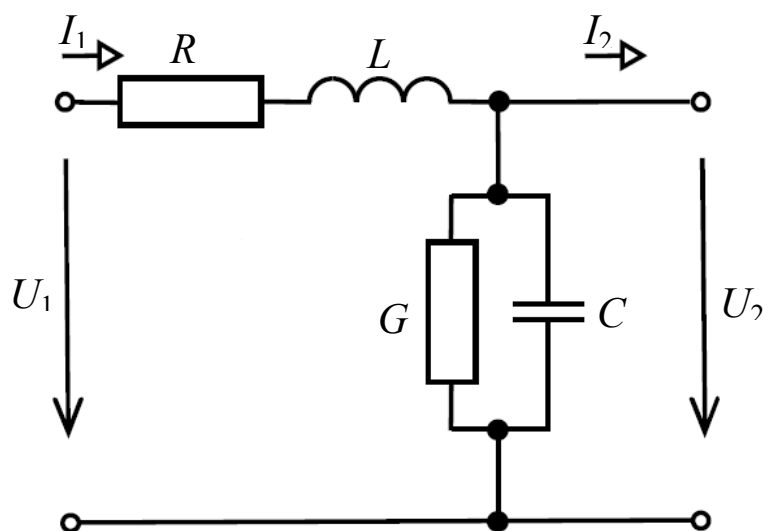
Na vedení dochází k přechodným dějům, tj. děje, který probíhá mezi dvěma ustálenými stavy. V obvodech se soustředěnými parametry se řeší pomocí primárních (základních) parametrů R , L , C , G . V obvodech s rozprostřenými parametry jsou základními veličinami sekundární parametry – vlnová impedance, činitel tlumení, rychlost šíření vln po vedení, které se odvodí z parametrů primárních. [1]

Primární parametry vodiče jsou:

- Činný odpor R (Ω)
- Indukčnost L (H)
- Kapacita C (F)
- Svod G (S)

Tyto parametry se také udávají na 1 km délky vedení:

- Činný odpor R_k ($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)
- Indukčnost L_k ($\text{H} \cdot \text{km}^{-1}$)
- Kapacita C_k ($\text{F} \cdot \text{km}^{-1}$)
- Svod G_k ($\text{S} \cdot \text{km}^{-1}$) [7]



Obr. 1.1 Obvodové schéma elementu vedení

Podélná impedance vedení:

$$\hat{Z} = R + j\omega L = R + jX \quad (\Omega) \quad (1.1)$$

Kde	R	činný odpor
	X	induktivní reaktance

Příčná admitance vedení:

$$\hat{Y} = G + j\omega C = G + jB \quad (\text{S}) \quad (1.2)$$

Kde G svod
 B kapacitní susceptance

Krátká vedení (nn, vn)

U krátkých vedení respektujeme odpor a indukčnost. Celé vedení nahradíme jedním prvkem – obvod se soustředěnými parametry.

Dlouhá vedení (vvn)

U dlouhých vedení respektujeme odpor, indukčnost, kapacitu. U vedení se jmenovitým napětím 400 kV a výše respektujeme také svod. Celé vedení nelze nahradit jedním prvkem – obvod s rozprostřenými parametry. [8]

Činný odpor vedení

Vedení má svůj činný odpor, vzniká na něm úbytek napětí a činné ztráty ve formě tepla.

Závisí přímo úměrně na měrném elektrickém odporu vodiče (rezistivitě) a délce a nepřímo úměrně na jeho průřezu.

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad (\Omega; \Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}; \text{m}; \text{mm}^2) \quad (1.3)$$

Kde R odpor vedení
 ρ měrný odpor vodiče (rezistivita)
 l délka vedení
 S průřez vedení

Činný odpor je závislý teplotně:

$$R_{\vartheta} = R_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta) \quad (\Omega; \Omega; \text{K}^{-1}; \text{K}) \quad (1.4)$$

Kde R_{ϑ} činný odpor při teplotě ϑ
 R_{20} činný odpor při teplotě 20 °C
 α teplotní součinitel odporu
 $\Delta\vartheta$ teplotní rozdíl

Činný odpor je závislý frekvenčně:

Jedná se o tzv. skinefekt – proud je nerovnoměrně rozložen po průřezu vodiče. Pro průmyslový kmitočet 50 Hz je $k = 1$. [3] [8]

$$R_{\text{stř}} = k \cdot R_{\text{ss}} \quad (\Omega; -; \Omega) \quad (1.5)$$

Kde $R_{\text{stř}}$ činný odpor pro střídavý proud
 R_{ss} činný odpor pro stejnosměrný proud
 k činitel povrchového jevu

Dále je třeba brát v úvahu kroucení lan, odchylku skutečného průřezu a průhyb. [3]

Svod vedení

Svod způsobuje činné ztráty (tzv. příčné ztráty), značně závisející na napětí a povětrnostních vlivech, na zatížení závisejí málo.

Příčné ztráty u venkovních vedení:

- Ztráty korónou
- Ztráty svodem přes izolátory

Příčné ztráty u kabelových vedení:

- Dielektrické ztráty v izolaci kabelu [3]

Indukčnost vedení

Pokud vodičem protéká elektrický proud, tak se kolem něj vytvoří elektromagnetické pole, které působí na samotný vodič i jeho okolí. [8]

Vlastní indukčnost:

$$L = 0,46 \cdot \log \frac{2 \cdot l}{r} - 0,15 \quad (\text{mH} \cdot \text{km}^{-1}) \quad (1.6)$$

Kde L vlastní indukčnost
 l délka vedení
 r poloměr vodiče

Vzájemná indukčnost:

$$M = 0,46 \cdot \log \frac{2 \cdot l}{a} - 0,2 \quad (\text{mH} \cdot \text{km}^{-1}) \quad (1.7)$$

Kde M vzájemná indukčnost
 l délka vedení
 a vzdálenost vodičů

Svazkové vodiče

U vedení velmi vysokého napětí je nevhodné používat jeden vodič, a proto je fázový vodič tvořen několika paralelními vodiči. Omezí se tím vliv koróny, usnadní se montáž vodičů, sníží se indukčnost a induktivní reaktance. Nejčastěji používaný je trojsvazek, vyskytuje se i dvousvazek a čtyřsvazek. [2] [8]

Střední indukčnost vedení se svazkovými vodiči:

$$L_{\text{stř}} = 0,46 \cdot \log \frac{d_s}{r_e} + \frac{0,05}{n} \quad (\text{mH} \cdot \text{km}^{-1}) \quad (1.8)$$

Střední vzdálenost vodičů:

$$d_s = \sqrt[3]{d_{12} \cdot d_{13} \cdot d_{23}} \quad (\text{m}) \quad (1.9)$$

Ekvivalentní poloměr:

$$r_e = \sqrt[n]{r \cdot d^{n-1}} \quad (\text{m}) \quad (1.10)$$

Kde	r_e	ekvivalentní poloměr
	r	poloměr vodiče
	d	vzdálenost vodičů ve svazku
	n	počet vodičů ve svazku

Kapacita vedení

Pokud vodičem protéká elektrický proud, tak se kolem něj vytvoří elektrické pole, které působí na samotný vodič i jeho okolí. [8]

$$C = \frac{0,0242}{\log\left(\frac{d_s \cdot 2 \cdot m}{r \cdot D_s}\right)} \quad (\mu F \cdot km^{-1}) \quad (1.11)$$

Kde	C	kapacita vedení
	d_s	střední vzdálenost vodičů
	r	poloměr vodiče
	m	střední vzdálenost vodičů od země
	D_s	střední vzdálenost od obrazu

Svazkové vodiče

$$C = \frac{0,0242}{\log\left(\frac{d_s \cdot 2 \cdot m}{r_e \cdot D_s}\right)} \quad (\mu F \cdot km^{-1}) \quad (1.12)$$

Kde	r_e	ekvivalentní poloměr
-----	-------	----------------------

Rozvodné soustavy jsou venkovní nebo kabelové. Elektrické parametry obou typů vedení nebudou stejné, protože k přenosu v nich dochází za jiných fyzikálních podmínek a v rozdílném prostředí. [7]

1.2 Hladiny napětí

- Malé napětí (mn) je střídavé napětí do 50 V fázové
- Nízké napětí (nn) je střídavé napětí do 600 V fázové
- Vysoké napětí (vn) je střídavé napětí do 52 kV sdružené
- Velmi vysoké napětí (vvn) je střídavé napětí do 300 kV sdružené proti zemi
- Zvláště vysoké napětí (zvn) je střídavé napětí do 800 kV sdružené proti zemi
- Ultra vysoké napětí (uvn) je střídavé napětí nad 800 kV sdružené proti zemi [1]

Přenosová soustava – 110 kV, 220 kV, 400 kV

Distribuční soustava – 0,4 kV, 22 kV, dále také 6 kV, 10 kV, 35 kV, 110 kV

Rozvody v průmyslu – 500 V, 690 V, 6 kV

1.3 Silové elektrické vedení

Z konstrukčního hlediska se dá rozdělit na vedení venkovní a kabelové. Nejprve se provede jeho elektrický návrh, poté přichází na řadu návrh konstrukční a mechanický. [2]

Venkovní vedení

Jeho mechanický návrh výrazně ovlivňují klimatické podmínky, které se navíc mohou podél vedení značně měnit. Elektrické venkovní vedení tvoří stožáry, vodiče, izolátory a armatury, základy. Na vedení se používají, z hlediska konstrukce, lana prostá a kombinovaná, dráty, závěsné kabely a svazkové vodiče. Venkovní sítě jsou na jednu stranu levnější než kabelové, ale jsou více namáhány mechanicky. Venkovní vedení jsou vedení vysokého, velmi vysokého a zvláště vysokého napětí. [2]

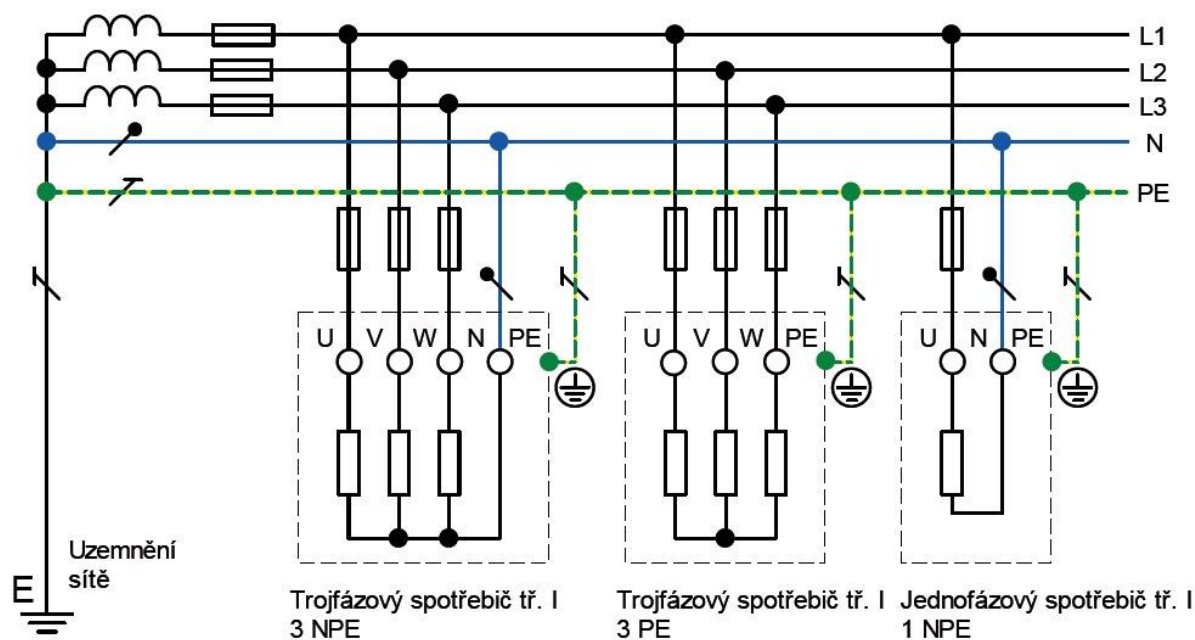
Kabelové vedení

Používají se pro elektrická silová vedení až do napětí 110 kV. Jeho mechanický a konstrukční návrh je jednodušší než u venkovního vedení. Jednožilové kabely se používají pro vedení vn a vvn, pro nižší úrovně napětí kabely vícežilové. Problémy mohou vzniknout při jejich kladení, např. je třeba zamezit jejich poškození při ohýbání, uložení do předepsané hloubky apod. Kabely je nutno chránit proti mechanickému poškození, např. jsou kryty cihlami, tvárnicemi, dlaždicemi apod. Samotné kabely lze klást na rovný poklad, kabelové lávky, rošty, stěny, pod omítku, do země. [2]

1.4 Rozdělení rozvodných sítí TN, TT, IT

Síť TN-S

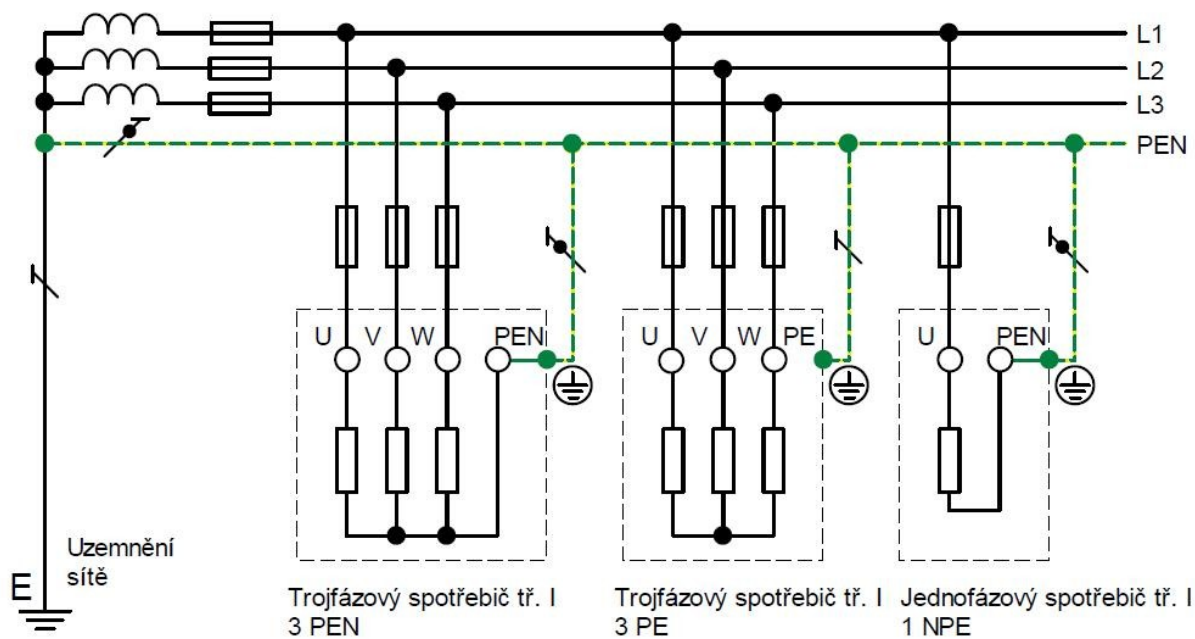
Jedná se o síť, ve které jsou ochranný vodič a střední pracovní vodič od sebe odděleny. Uzel sítě je přímo uzemněný, neživé části spotřebičů jsou spojeny ochranným vodičem. Používá se pro domovní a průmyslové instalace nízkého napětí. [5]



Obr. 1.2 Síť TN-S [5]

Síť TN-C

V této síti jsou ochranný a střední pracovní vodič spojeny do jednoho vodiče označeného PEN. Uzel sítě je přímo uzemněný, neživé části spotřebičů jsou spojeny ochranným vodičem. Používá se pro domovní přípojky a hlavní domovní vedení. V soustavě TN-C nesmí dojít k rozdělení vodiče na PE a N. [5]

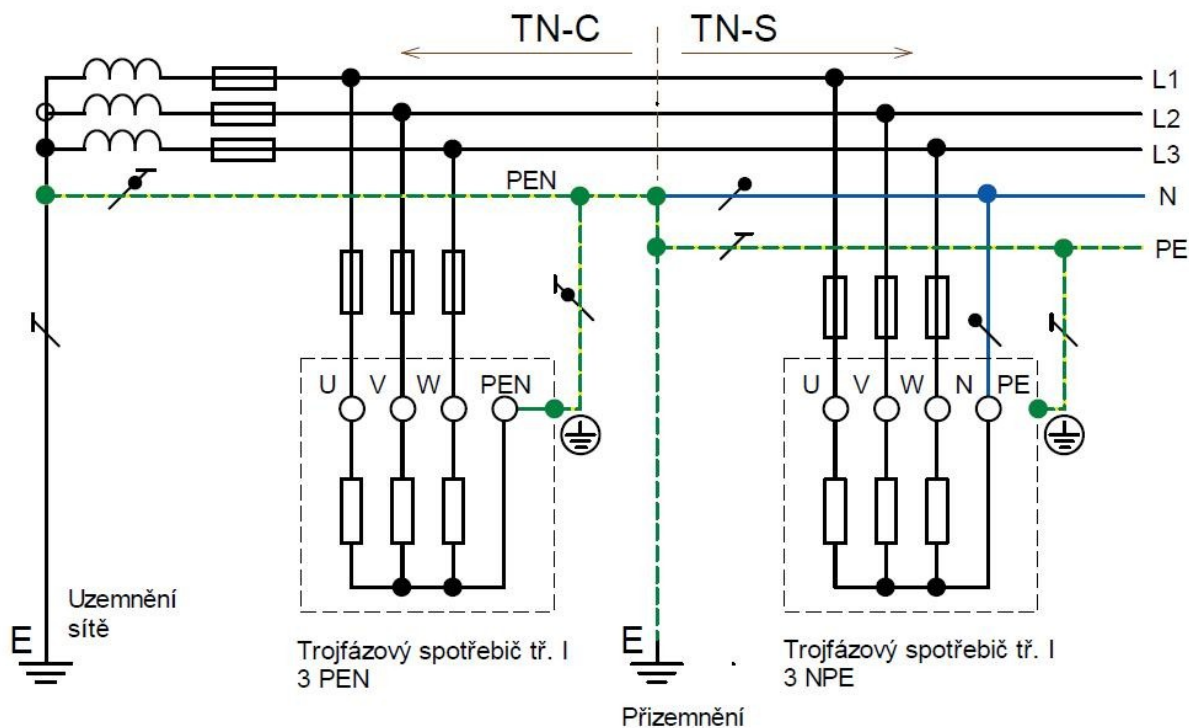


Obr. 1.3 Síť TN-C [5]

Sít' TN-C-S

Neživé části jsou spojeny ochranným vodičem a uzel sítě je přímo uzemněn. Část sítě se provede jako TN-C, v určitém místě se rozdělí vodič PEN na PE a N a dále pokračuje jako sít' TN-S. Po rozdělení se vodiče PE a N už nikdy nesmí spojit. Používá se u domovní instalace, kdy rozvod do bytové rozvodnice je proveden v síti TN-C, rozvod za bytovou rozvodnicí je proveden v síti TN-S.

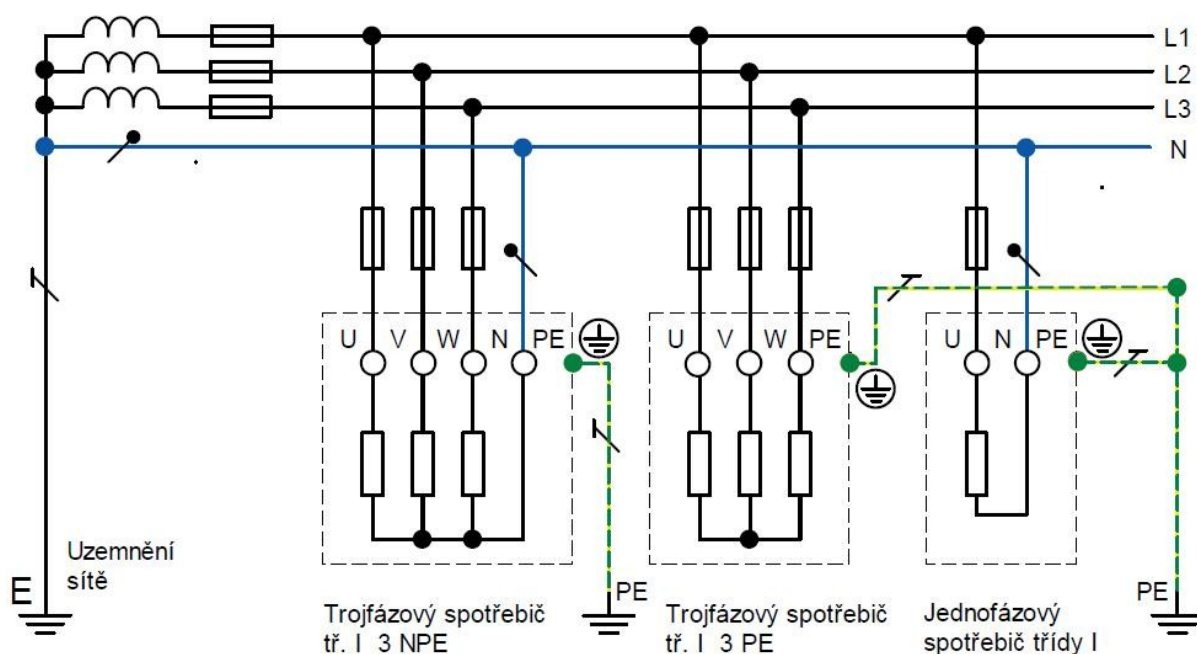
K rozdělení vodiče PEN dochází v bytové rozvodnici. [5]



Obr. 1.4 Sít' TN-C-S [5]

Sít' TT

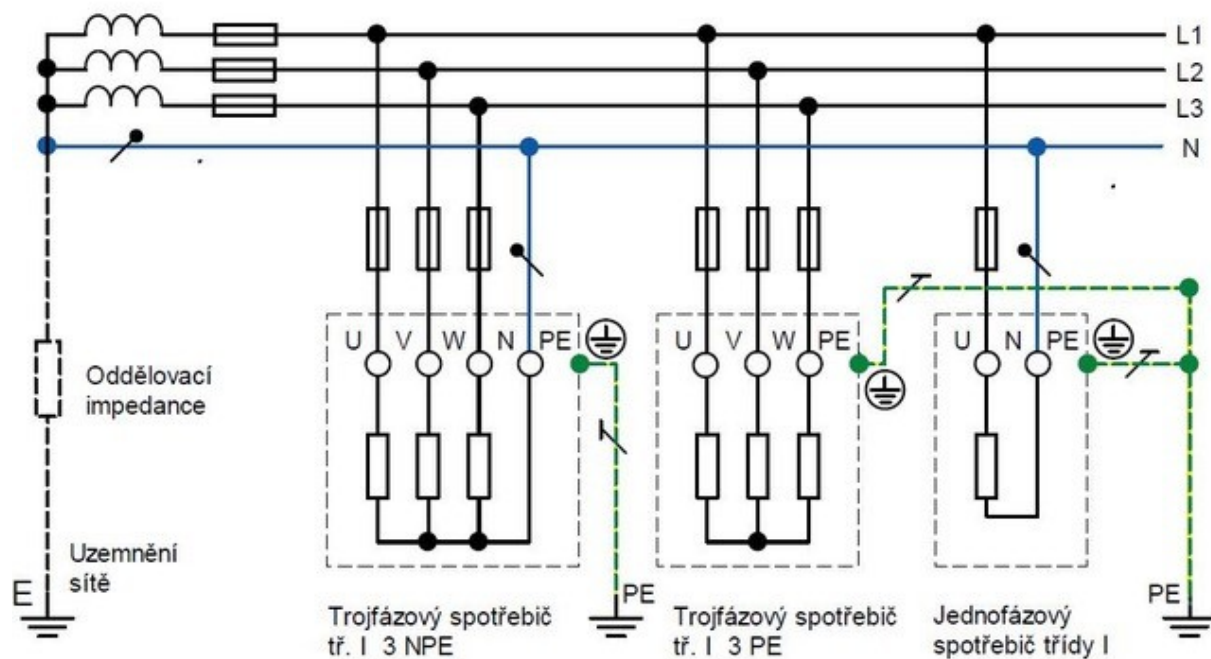
Neživé části nejsou spojeny ochranným vodičem, ale jsou uzemněny nezávisle na uzemněném bodu sítě buď zvlášť, nebo skupinově. Uzel této sítě je přímo uzemněn. Používá se například na staveništích. [5]



Obr. 1.5 Síť TT [5]

Síť IT

Tato síť je izolovaná, nebo uzemněná přes velkou impedanci nebo průrazku, neživé části se přímo uzemní jednotlivě, po skupinách, nebo jsou spojeny navzájem jedním uzemněným vodičem. Jako síť IT se provozují sítě vysokého a nízkého napětí (např. v průmyslu 500 V). Do uzlu se zapojuje tlumivka kvůli kompenzaci kapacitních zemních proudů, které vznikají při zemním spojení. [5]



Obr. 1.6 Síť TN-S [5]

1.5 Materiály vodičů

Požadavky na vodiče pro venkovní vedení jsou následující:

- Velká pevnost
- Malý elektrický odpor
- Malé pořizovací náklady
- Odolnost proti chemickým vlivům
- Z hlediska dopravy by hmotnost neměla být příliš velká, ale z hlediska větru by hmotnost neměla být příliš malá
- Z hlediska námrazy a vlivu větru by měly mít malý průměr, ale z hlediska rušení korónou velký průměr [2]

Měď (Cu)

Mezi její přednosti patří výborná elektrická vodivost, odolnost proti chemickým a atmosférickým vlivům a mechanické vlastnosti. Nevýhodou je vyšší cena oproti hliníku. [2] [4]

Rozdělení mědi:

Měď měkká

- mez pevnosti v tahu je v rozmezí 200 až 300 MPa
- nepruží
- použití: u venkovního vedení jen na vázání

Měď polotvrdá

- mez pevnosti v tahu je v rozmezí 290 až 370 MPa
- mírně pruží
- použití: vodiče pro venkovní vedení, omezeno pouze pro vedení do 1 kV

Měď tvrdá

- mez pevnosti v tahu je minimálně 370 MPa
- značně pruží
- použití: vodiče pro venkovní vedení [2] [4]

Hliník (Al)

Hliník má oproti mědi větší elektrický odpor, jeho vodivost je asi 65% vodivosti mědi. Používá se pro dráty, lana prostá a kombinovaná pro venkovní vedení nízkého, vysokého a velmi vysokého napětí. Jeho výhodou je asi 3 krát nižší hmotnost oproti mědi, je stálý na vzduchu a odolný proti povětrnostním vlivům. Nevýhodou je pak velmi malá pevnost, která se u lan kompenzuje ocelovými dráty, které tvoří nosnou část tzv. duši. [2] [4]

Slitiny hliníku (Al)

Aldrey

- skládá se z 98,7 % Al, 0,5 % Mg, 0,5 % Si a 0,3 % Fe
- je zhruba 2 krát pevnější než čistý hliník
- tepelným zpracováním a tvářením za studena lze pevnost v tahu zvětšit až na 300 MPa, tato pevnost je dostatečně velká na výrobu drátů a lan pro velmi vysoké napětí [2] [4]

Jereal

- obsahuje navíc 0,15 % Zn
- mez pevnosti v tahu je až 360 MPa
- použití: vodiče venkovního vedení [4]

Ocel (Fe)

Používá se ocel Fe 35 (mez pevnosti v tahu 350 MPa), dále Fe 50, Fe 70 a Fe 130. Elektrický odpor oceli je velký, a proto se používá jako nosná část kombinovaných lan AlFe, dále na zemní a kotevní lana. Ocelová lana i dráty se musí chránit proti korozi např. pozinkováním. [2]

Jiné

Je možné použít i jiné materiály, ale až po prověření v příslušné autorizované zkušebně. Použít se může např. bronz pro speciální účely. [2]

2. TEORETICKÝ ROZBOR VZNIKU ZEMNÍHO SPOJENÍ

Venkovní sítě vn a průmyslové sítě nn a vn mají nepřímo uzemněný uzel přes velkou impedanci nebo je uzel izolovaný. Tyto sítě jsou vystaveny ve značné míře atmosférickým vlivům, cizím zásahům a četným přepětím, které ovlivňují jejich bezporuchový chod. Následkem těchto jevů vznikají izolační vady jednotlivých fází především proti zemi – tzv. zemní spojení. Aby bylo možné udržet tyto sítě v provozu, tzn. nedošlo k odpojení od zdroje, provádí se kompenzace zemních proudů.

Rozdíl mezi jednofázovým zkratem a zemním spojením je následující:

Pokud v síti, která má uzel přímo uzemněný, dojde k vodivému spojení fáze se zemí, tak se jedná o jednofázový zkrat. Zkratový proud má indukční charakter a jeho velikost je blízká provoznímu proudu nebo je, ve většině případů, několikanásobně větší.

Jestliže dojde k vodivému spojení v síti IT, nejedná se už o jednofázový zkrat, ale o zemní spojení. V místě zemního spojení teče malý proud kapacitního charakteru, jehož velikost nezávisí na vzdálenosti místa zemního spojení od zdroje.

Jestliže se jedna z fází spojí se zemí, kapacitní proudy zdravých fází se uzavírají přes zem, zemní spojení a vinutí transformátoru. Pokud je hodnota poruchového proudu menší než stanovená hodnota, je možné síť provozovat dále.

Při zemním spojení může dojít ke vzniku oblouku, převážně v sítích s větší rozlohou, které mají větší kapacitu, pokud poruchový proud přesáhne 5 A. Vznik oblouku je silně nežádoucí, protože téměř vždy zasáhne sousední fáze a důsledkem jsou pak 2- nebo 3- fázové zkraty, následně přepálené vodiče, dřevěné stožáry a izolátory. [6] [9]

V průmyslových sítích může být uzel od země izolován, tj. není spojen se zemí, používání izolovaného uzlu je ale omezeno na síť malého rozsahu. V malých sítích nepřekročí kapacitní proud síť 20 A. [11]

Účinným prostředkem pro jeho potlačení je nepřímo uzemnit nulou transformátoru přes tlumivku. Její indukčnost je třeba nastavit tak, aby indukční proud tekoucí od tlumivky k místu zemního spojení kompenzoval kapacitní proudy zdravých fází a došlo tak k uhašení oblouku.

Dalším nebezpečím je vznik přepětí při nestabilně hořícím oblouku, tj. oblouk uhasíná a opětovně se zapaluje. Dochází ke vzniku přerušovaného zemního spojení, které může být zdrojem přepětí v síti. [6]

2.1 Rozdělení zemních spojení

Podle velikosti přechodového odporu

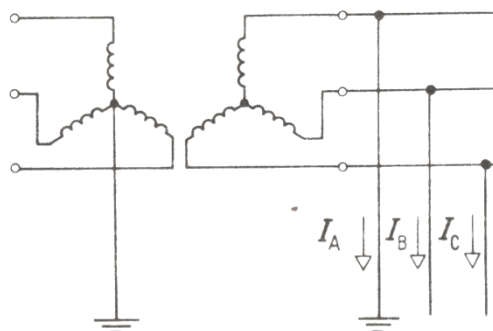
- a) Odporová – hodnota přechodového odporu je řádově několik set ohmů
- b) Kovová a oblouková – hodnota přechodového odporu je jen několik ohmů, zpravidla zanedbatelná

Podle doby trvání

- a) Mžiková – do 0,5 s
- b) Krátkodobá – do 5 min.
- c) Přerušovaná – mžiková nebo krátkodobá zemní spojení několikrát po sobě se opakující
- d) Trvalá – až do doby odstranění, zpravidla několik hodin. [7]

2.2 Trvalá zemní spojení

Výpočty se provádějí ve fázových hodnotách.



Obr. 2.1 Schematické znázornění zemního spojení [6]

Charakteristické rovnice pro zemní spojení

$$U_A = 0; I_B = 0; I_C = 0 \quad (2.1)$$

Tato rovnice je stejná jako charakteristická rovnice při výpočtu jednofázového zkratu.

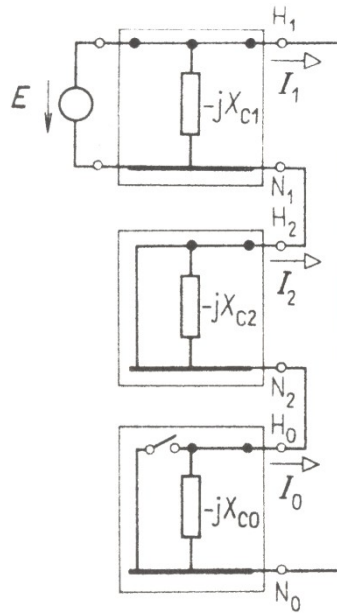
Pro složkové proudy platí:

$$I_1 = I_2 = I_0 = \frac{1}{3} \cdot I_A \quad (2.2)$$

Fázové veličiny vyjádříme pomocí sousledného proudu I_1 .

$$I_A = 3 \cdot I_1 \quad (2.3)$$

Podle této rovnice je možné propojit náhradní schémata složkových soustav.



Obr. 2.2 Propojení náhradních schémat složkových soustav při zemním spojení při zanedbání indukčních reaktancí článků ES [6]

Na základě náhradního schématu platí:

Pro složkové proudy:

$$I_1 = \frac{E}{Z_{c1} + Z_{c2} + Z_{c0}} = \frac{E}{-jX_C}; I_2 = I_1; I_0 = I_1 \quad (2.4)$$

Tato rovnice určuje velikost a orientaci složkových proudů vzhledem k fázoru E .

Pro složková napětí:

$$U_1 = E; U_2 = 0; U_0 = -E \quad (2.5)$$

Fázové proudy při zemní spojení získáme na základě rovnic (2.1) a (2.3)

$$I_A = 3 \cdot I_1; I_B = 0; I_C = 0 \quad (2.6)$$

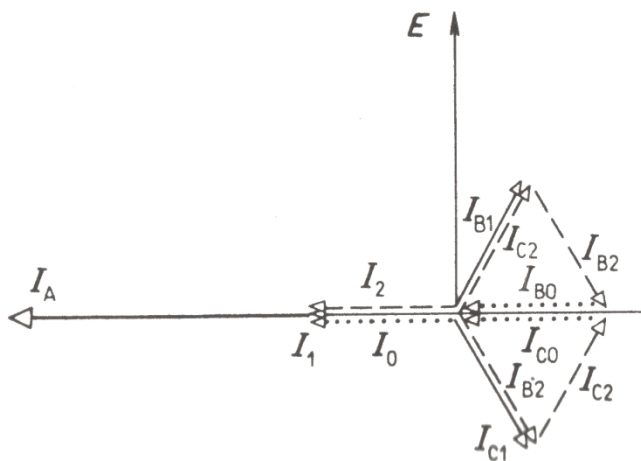
Tato rovnice určuje fázor proudu zemního spojení.

Fázová napětí se stanoví z rovnic:

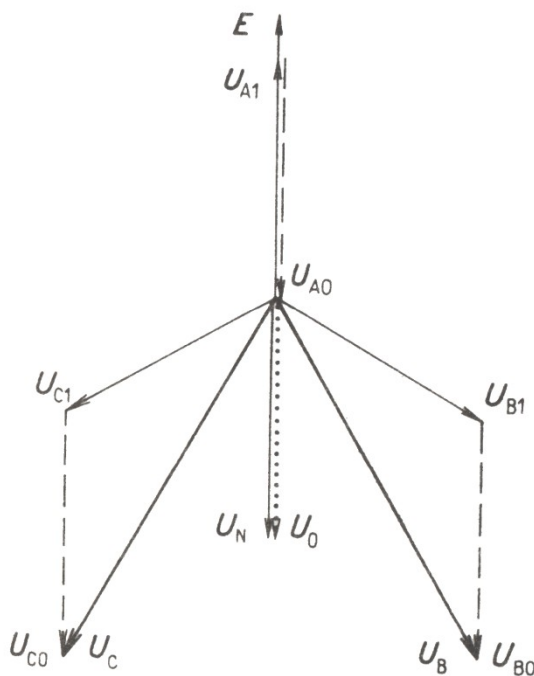
$$U_A = 0 \quad (2.7)$$

$$U_B = a^2 \cdot E - E = E_B - E \quad (2.8)$$

$$U_C = a \cdot E - E = E_C - E \quad (2.9)$$

$$U_N = \frac{1}{3} \cdot (U_A + U_B + U_C) = \frac{1}{3} \cdot (a^2 \cdot E - E + a \cdot E - E) = \frac{1}{3} \cdot (-3 \cdot E) = -E \quad (2.10)$$


Obr. 2.3 Fázorový diagram proudů při trvalém zemním spojení [6]

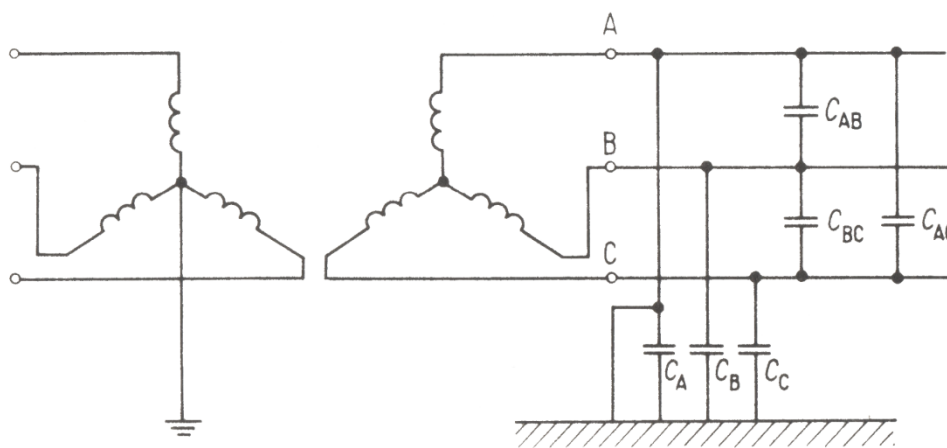


Obr. 2.4 Fázorový diagram napětí při trvalém zemním spojení [6]

2.3 Přerušované zemní spojení

Všechna zemní spojení nejsou trvalého charakteru, mnohdy jsou provázeny hořením oblouku, vznikne přerušované zemní spojení, které v síti s izolovaným uzlem způsobí vznik nebezpečných přepětí.

Oblouk hoří nestabilně, při průchodu proudů nulou se uhasíná a následně se následkem růstu napětí na postižené fázi opět zapálí. Opakující se hasnutí a znovuzapálení oblouku může způsobit vznik přepětíových oscilací v celé elektrické síti. Pokud se některá z fází vodič spojí se zemí, nastává přechodný jev, po jehož odeznění je napětí postižené fáze nulové a napětí na zdravých fázích vzroste na hodnotu sdruženého napětí. Při přechodu od normálního ustáleného chodu k ustálenému stavu se zemním spojením bude mít síť kmitavý charakter. Celá rozsáhlá elektrická síť se účastní oscilací. Indukčnosti a kapacity celé sítě včetně napájecích transformátorů patří mezi hlavní parametry určující frekvenci těchto oscilací. Indukčnosti vodičů venkovních vedení a kabelů se při výpočtech zanedbají. [6]



Obr. 2.5 Schéma sítě s izolovaným uzlem při chodu se zemním spojením [6]

Na obr. 2.5 je schéma elektrické sítě se zemním spojením ve fázi A. Zdrojem napětí je ve schématu transformátor, který je připojený na ideální napěťový zdroj. Kapacita C_A fáze A k zemi se vodivým spojením fáze A se zemí zkratuje a kapacity C_B , C_{AB} , C_C a C_{AC} budou spojeny paralelně.

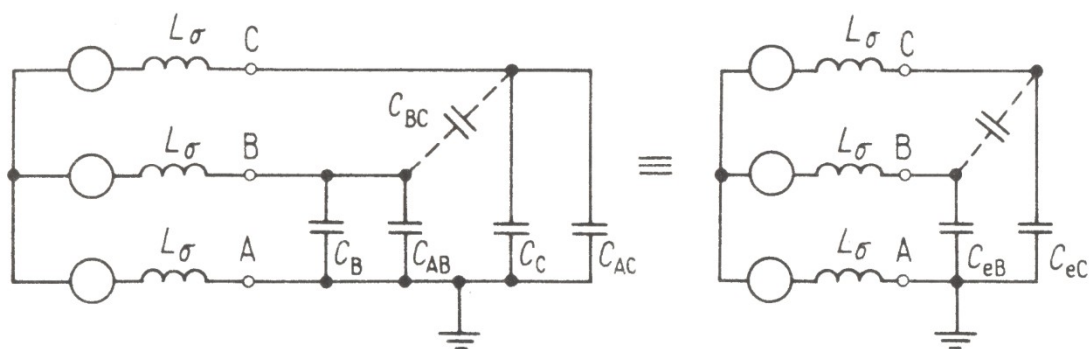
Pro tyto paralelně zapojené kapacity bude v symetrických sítích platit:

$$C_A = C_B = C_C = C \quad (2.11)$$

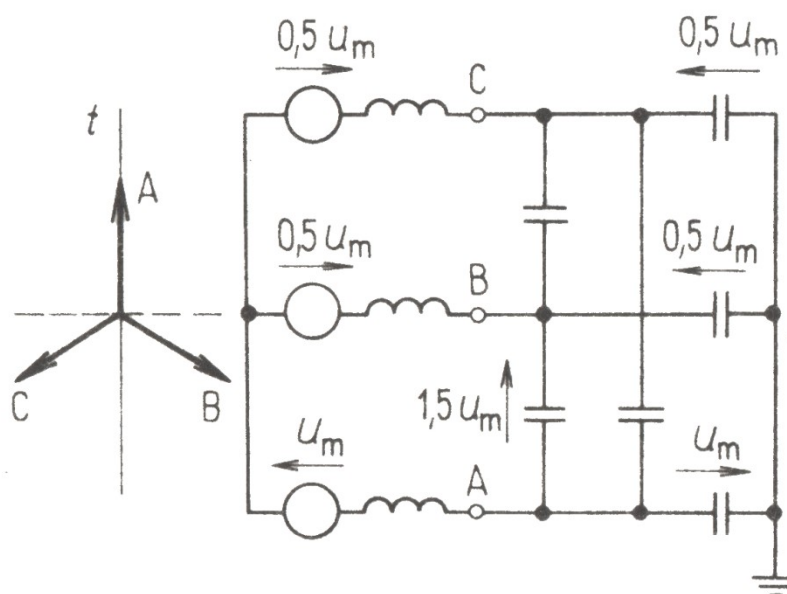
$$C_{AB} = C_{AC} = C_{BC} = C' \quad (2.12)$$

Výsledná kapacita je dána paralelní kombinací kapacit C_B , C_{AB} a C_C , C_{AC}

$$C_{eB} = C_{eC} = C_e = C + C' \quad (2.13)$$



Obr. 2.6 Náhradní schéma ES při uzemnění fáze A [6]



Obr. 2.7 Náhradní schéma ES pro okamžik vzniku zemního spojení [6]

Uvažujme, že při maximální hodnotě napětí fáze A došlo v této fázi k zemnímu spojení. Napětí u_m je amplituda sinusového průběhu fázového napětí.

$$u_{A[0]} = u_m \quad (2.14)$$

Napětí na kapacitách C_B a C_C byla v okamžiku zemního spojení dána okamžitými hodnotami fázových napětí

$$u_{B[0]} = u_{C[0]} = -0,5 \cdot u_m \quad (2.15)$$

Napětí na kapacitách mezi fázemi B, C a postiženou fází A byla v okamžiku zemního spojení dána okamžitými hodnotami napětí

$$u_{BA[0]} = u_{CA[0]} = -0,5 \cdot u_m - u_m = -1,5 \cdot u_m \quad (2.16)$$

Při vzniku zemního spojení budou mít kapacity C a C' různá napětí a po paralelním sepnutí se jejich celkový náboj nezmění okamžitě (skokově) vlivem indukčnosti napájecího transformátoru.

Výsledné napětí v prvním okamžiku na ekvivalentní kapacitě C_e bude

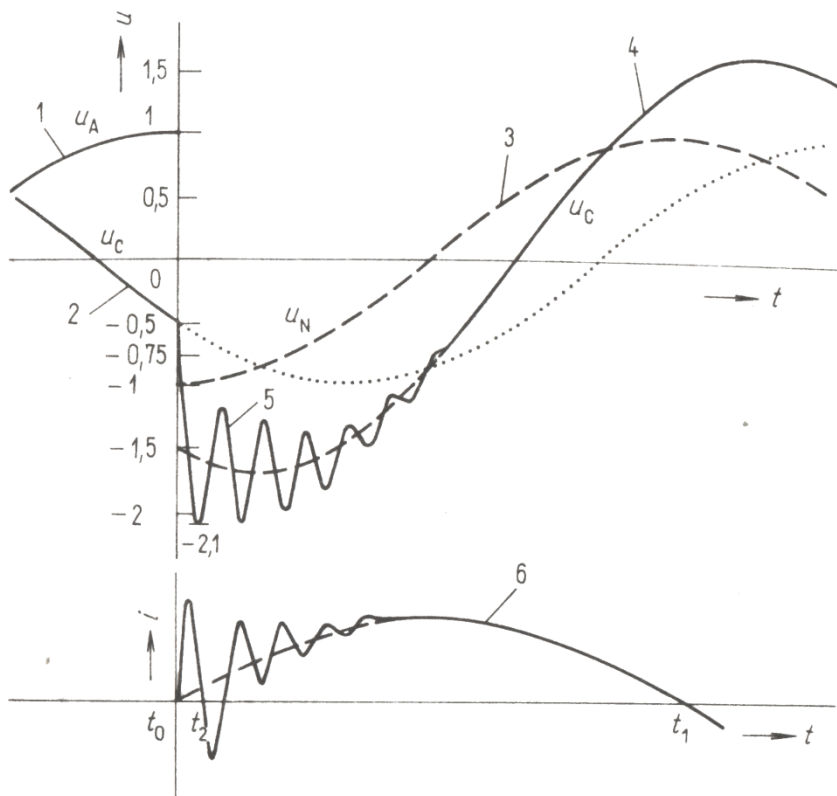
$$u_{eBo} = u_{eCo} = u_{eo} = \frac{Q_e}{C_e} = \frac{Q_{Co} + Q'_{Co}}{C + C'} = \frac{Q_{C[o]} + Q'_{C[o]}}{C + C'} = \frac{-0,5 \cdot u_m \cdot C - 1,5 \cdot u_m \cdot C'}{C + C'} =$$

$$= -\frac{C+3 \cdot C'}{2 \cdot (C+C')} \cdot u_m \quad (2.17)$$

Kapacita C bývá 3 až 4 krát větší než C' . Pokud si zvolíme $C = 3 \cdot C'$ pro napětí u_{eo} platí

$$u_{eo} = -\frac{C+3 \cdot C'}{2 \cdot (C+C')} \cdot u_m = -\frac{3+3 \cdot 1}{2 \cdot (3+1)} \cdot u_m = -\frac{3}{4} \cdot u_m \quad (2.18)$$

Porovnáním rovnic (2.16) a (2.18) dospíváme k závěru, že v prvním okamžiku zemního spojení je napětí zdroje působící na kapacitu C_e vyšší než napětí u_{eo} na této kapacitě. Vznikne nabíjecí proces oscilačního charakteru, s frekvencí vyšší než síťová (asi 200 Hz až 800 Hz), přes indukčnosti napájecího transformátoru. [6]



Obr. 2.8 Průběh napětí při vzniku zemního spojení [6]

Obr. 2.8 je kreslen pro fázi C, kde:

- Křivka 1 je napětí u_A
- Křivka 2 je původní napětí u_C
- Křivka 3 je napětí uzlu N
- Křivka 4 je napětí u_C
- Křivka 5 je průběh přechodné složky napětí
- Křivka 6 je průběh proudu zemního spojení

Elektromotorickým napětím zdroje je určen průběh napětí nového ustáleného stavu $u_u(t)$, který se získá sečtením sousledné a netočivé (nulové) složky napětí. Jinými slovy se získá sečtením napětí uzlu napájecího transformátoru a původního fázového sinusového průběhu napětí.

Amplituda přechodné (volné složky) napětí klesne za první půlperiodu na 80 % až 90 % výchozí hodnoty, což bylo zjištěno na základě měření v reálných sítích.

Rozdílem počátečního napětí nového ustáleného provozního stavu u_{uo} a napětí u_{eo} dostaneme velikost počáteční amplitudy.

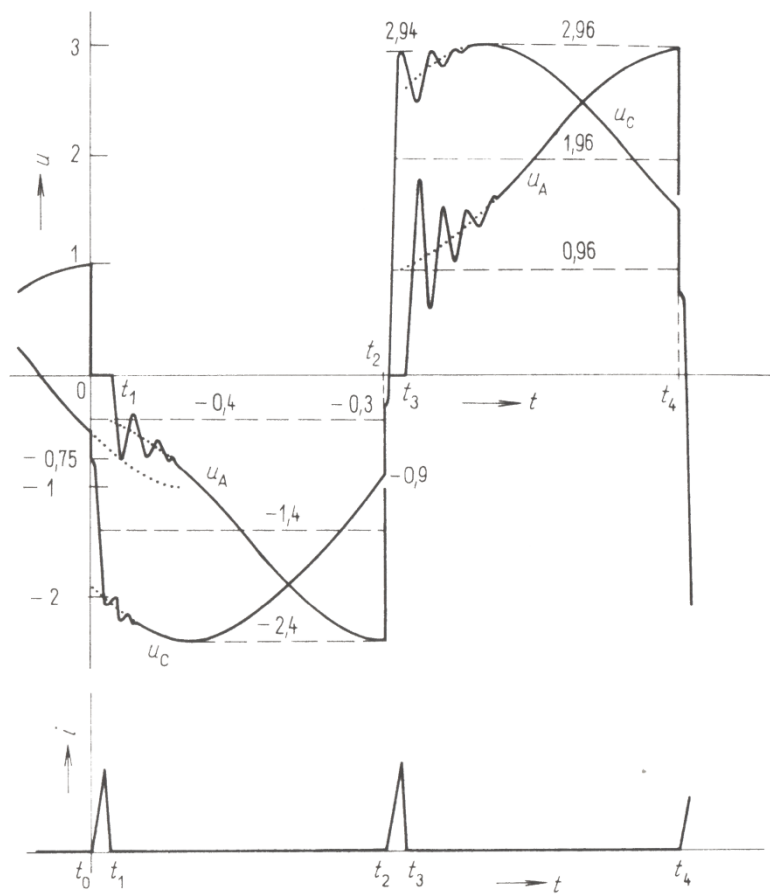
$$u_{vo} = u_{uo} - u_{eo} \quad (2.19)$$

Síť zůstává, po doznění přechodného jevu, v ustáleném chodu se zemním spojením dokud hoří oblouk. Při průchodu proudu nulou vznikají optimální podmínky k jeho uhašení.

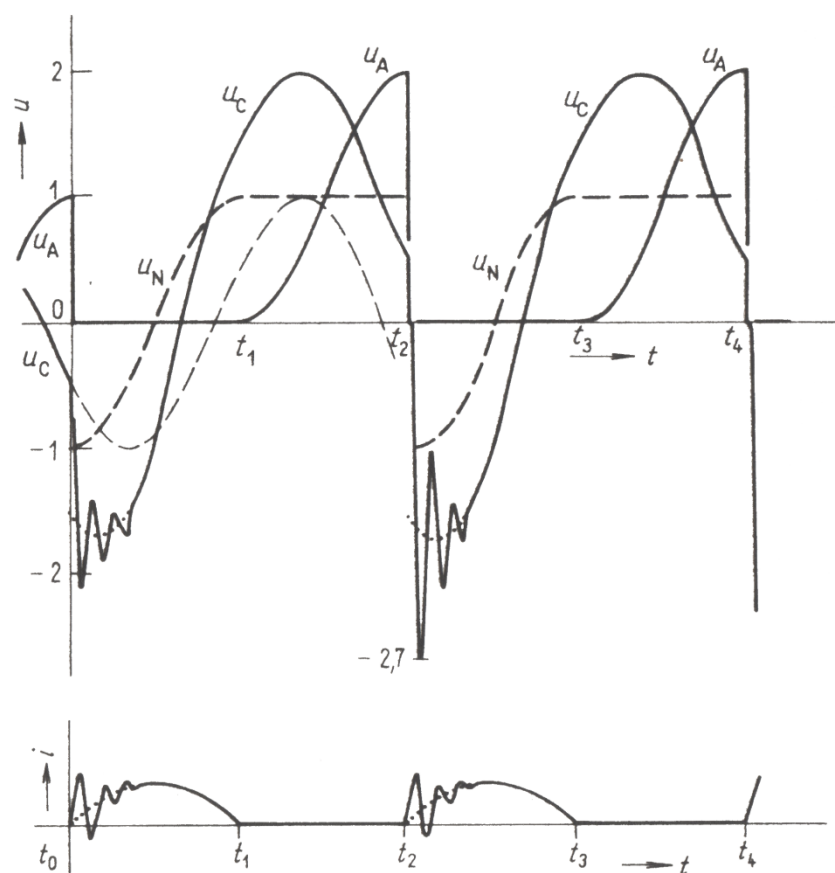
Teorie vzniku přepětí při přerušovaném zemním spojení:

Jedna z teorií vypracovaná W. Petersenem předpokládá přerušování zemního spojení (uhašení oblouku) při prvním průchodu přechodného proudu nulou. Zemní spojení vznikne vždy při maximální hodnotě napětí postižené fáze.

Teorie Peterse a Slepiana předpokládá, že zemní spojení se přeruší (oblouk uhasne), když proud s frekvencí sítě prochází nulou. K obnovení zemního spojení dojde při maximálním napětí postižené fáze. Výsledky měření provedených v sítích se shodují spíše s touto teorií. [6]



Obr. 2.9 Průběh napětí při přerušovaném zemním spojení (podle teorie Petersena) [6]



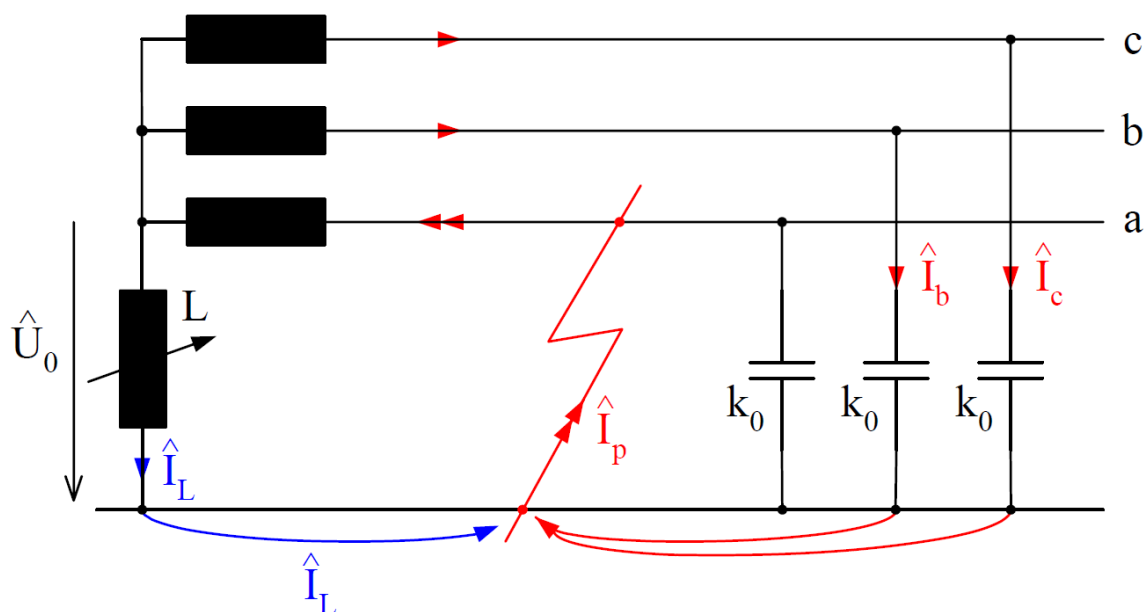
Obr. 2.10 Průběh napětí při přerušovaném zemním spojení (podle teorie Peterse a Slepiana) [6]

Sítě s IT jsou sítě malého rozsahu a nepříliš vysokého napětí. Síť si po přerušení spojení ponechá náboj, který je v případě kompenzované sítě vybit přes indukčnost v uzlu transformátoru. Sníží se napětí uzlu a napětí na fázích narůstá pomaleji a díky tomu se sníží pravděpodobnost opětovných zapálení oblouku. [6]

3. MOŽNOSTI KOMPENZACE ZEMNÍCH KAPACITNÍCH PROUDŮ

Kompence zemních proudů je doporučena v sítích, kde zemní proud převyšuje 5 A, a povinná při proudech větších než 10 A. [7]

3.1 Sít' s nepřímo uzemněným uzlem přes zhášecí tlumivku (Petersonovu cívku)



Obr. 3.1 Činnost zhášecí tlumivky [9]

Kompence zemních proudů pomocí plynule regulovatelné zhášecí tlumivky, zapojenou mezi uzel transformátoru a zem, je nejpoužívanější způsob kompenzace v České republice. Výhodou je udržení provozu rozsáhlejších venkovních sítí se zemním spojením a samouhašení oblouku u většiny přerušovaných zemních spojení. Nevýhodou je velmi obtížné naladění, a tedy použití, v kabelových sítích.

V kapacitně symetrické síti v bezporuchovém stavu je napětí uzlu transformátoru nulové. Při nesymetriích bývá napětí uzlu transformátoru nenulové, tj. $U_0 < 0,01 U_f$. V případě dokonalého zemního spojení napětí uzlu bude $\hat{U}_0 = -\hat{U}_{fa}$ a proud tekoucí zhášecí tlumivkou bude ideálně zpožděn za tímto napětím o $\pi/2$ (90°). Tlumivka ale není ideální, má svůj odpor a zpoždění proudu za napětím nebude o $\pi/2$. [7] [9]

Tlumivka je laděna automatickou. Ta nastaví tlumivku a celkovou kapacitu sítě do paralelní rezonance. Při rezonanci je tlumivka namáhána vyšším napětím, proto se tlumivka mírně rozladí, aby napětí pokleslo. [10]

Ideálně by při kompenzaci neměl téct místem poruchy žádný proud, ale ve skutečnosti poteče místem poruchy tzv. zbytkový proud, obsahující nevykompenzovaný proud vlivem nepřesného nastavení

indukčnosti, nevykompenzovatelnou činnou složku způsobenou svody vedení, činný odpor tlumivky a proudy vyšších harmonických, hlavně třetí, páté a sedmé. [7] [10]

Při vhodně nastavené indukčnosti dojde k vykompenzování zemních proudů. Proud indukčního charakteru tekoucí od tlumivky do místa zemního spojení je v protifázi s proudy kapacitního charakteru zdravých fází a místem zemního spojení teče pouze zbytkový proud. Jestliže je velikost zbytkového proudu menší než 5 A, dojde k uhašení oblouku vlivem deionizace jeho dráhy. [7] [9]

U dobře vyladěné kompenzované sítě má zbytkový proud činný charakter a je mnohem nižší velikosti než kapacitní proud sítě. Tím se jednak výrazně zlepši podmínky pro samozhašení oblouku a nároky na uzemnění v síti budou příznivější. [9]

Při úplné kompenzaci bude platit:

$$\hat{I}_L = -\hat{I}_P \quad (3.1)$$

Poruchový proud:

$$\hat{I}_P = 3 \cdot j\omega \cdot k_0 \cdot \hat{U}_0 \quad (\text{A}; \text{s}^{-1}; \text{F}; \text{V}) \quad (3.2)$$

Proud tekoucí ideální zhašecí tlumivkou:

$$\hat{I}_L = -j \frac{\hat{U}_0}{\omega \cdot L} \quad (\text{A}; \text{V}; \text{s}^{-1}; \text{H}) \quad (3.3)$$

Dosazení rovnice 3.2 a 3.3 do rovnice 3.1

$$-j \frac{\hat{U}_0}{\omega \cdot L} = -3 \cdot j\omega \cdot k_0 \cdot \hat{U}_0 \quad (3.4)$$

Potřebná indukčnost ideální zhašecí tlumivky:

$$L = \frac{1}{3 \cdot \omega^2 \cdot k_0} \quad (\text{H}; \text{s}^{-1}; \text{F}) \quad (3.5)$$

Zdánlivý výkon zhašecí tlumivky:

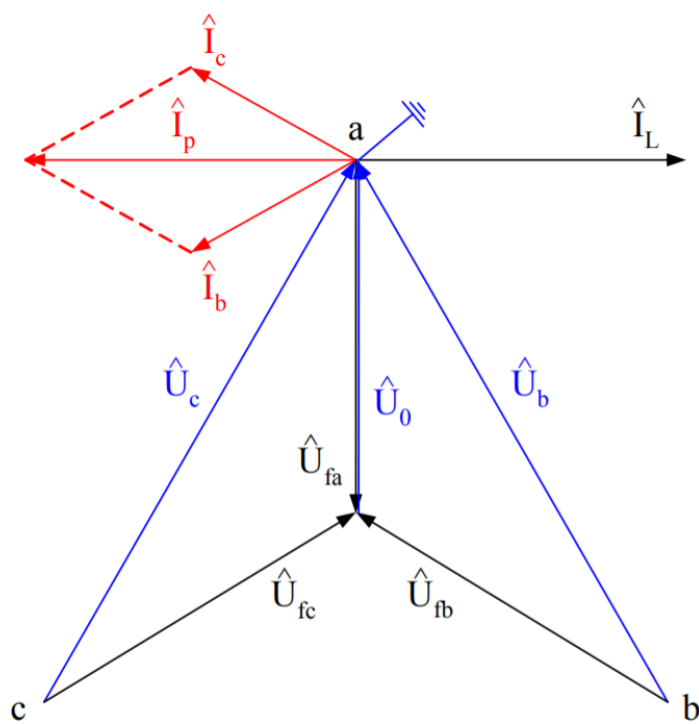
$$\hat{S} = \hat{U}_0 \cdot \hat{I}_L^* = j \frac{\hat{U}_0 \cdot \hat{U}_0^*}{\omega \cdot L} = j3 \cdot \omega \cdot k_0 \cdot U_0^2 = j3 \cdot \omega \cdot k_0 \cdot U_f^2 = j\omega \cdot k_0 \cdot U_S^2 \quad (\text{VA}; \text{s}^{-1}; \text{F}; \text{V}) \quad (3.6)$$

Jalový indukční výkon:

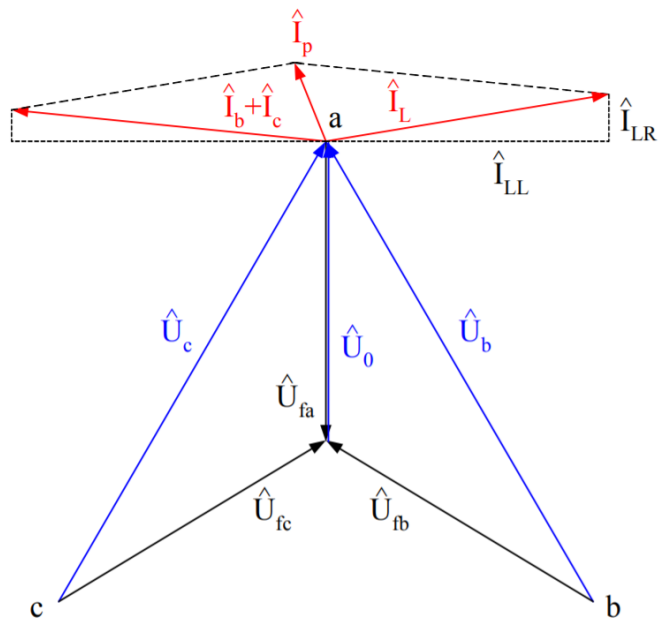
$$Q = \omega \cdot k_0 \cdot U^2 \quad (\text{VAr}; \text{s}^{-1}; \text{F}; \text{V}) \quad (3.7)$$

Poruchový proud lze vyjádřit:

$$\hat{I}_P = \left[\frac{1}{R_L} + 3 \cdot G_0 + j \left(3 \cdot \omega \cdot k_0 - \frac{1}{\omega L} \right) \right] \cdot \hat{U}_0 \quad (3.8)$$

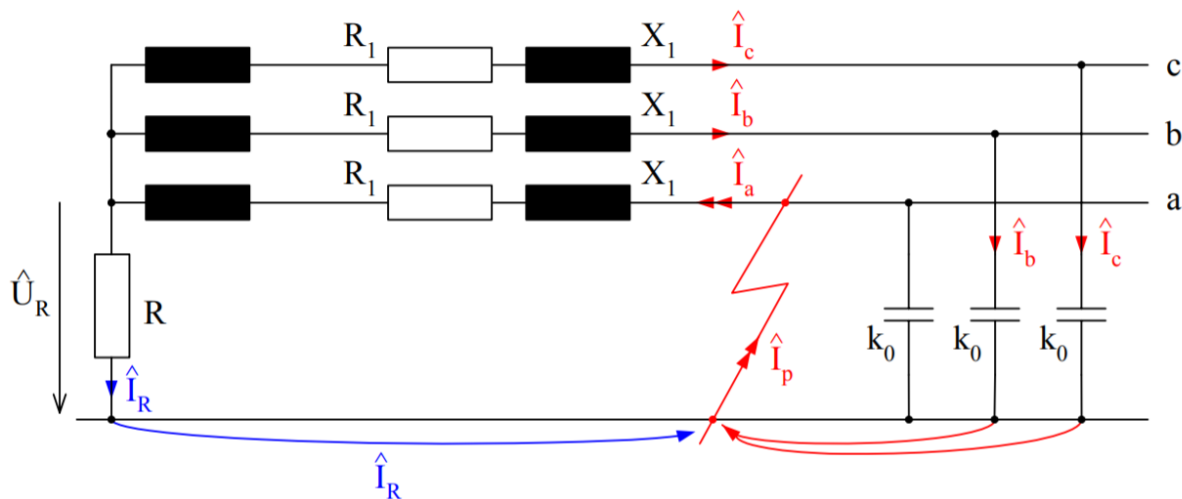


Obr. 3.2 Princip kompenzace zemního proudu [9]



Obr. 3.3 Fázorový diagram se zbytkovým proudem [9]

3.2 Sít' s nepřímo uzemněným uzlem přes odpor



Obr. 3.4 Činný odpor v uzlu trojfázové sítě [9]

U tohoto způsobu kompenzace jsou uzel transformátoru a zem spojeny přes odpor. Odpor se používá místo zhášecí tlumivky tam, kde není použití tlumivky vhodné, např. rozlehlé kabelové sítě. V těchto sítích dosahují poruchové kapacitní proudy velkých hodnot a vzniká problém s naladěním zhášecí tlumivky. Použití odporu je možné tam, kde je povolen maximální jednofázový zkratový proud 1000 A u kabelových a 300 A u venkovních a smíšených sítí. [9] [11] [15]

V případě, že bychom v kabelové síti použili zhášecí tlumivku, tak při zemním spojení by bylo vedení provozováno dále. Napětí zdravých fází vzroste až na hodnotu sdruženého napětí. Vyšší napětí namáhá izolace zdravých fází a vzniká riziko vícenásobných poruch. [10]

Pokud bychom měli kabelovou síť nepřímo uzemněnou přes odpor a na jedné z fází se poruší izolace a tato fáze se spojí vodič se zemí, jedná se o jednofázový zkrat a potom musí dojít k vypnutí postiženého úseku působením nadproudových ochran. Díky vypínání zemních poruch se u sítě uzemněné nepřímo přes odpor téměř nevyskytují vícenásobné poruchy. [10] [11]

Poruchový proud, který prochází místem izolační poruchy, omezíme vhodnou volbou odporu. Poruchový proud je dán vektorovým součtem proudu tekoucího odporem a kapacitních proudů sítě. Jeho velikost klesá se vzdáleností od místa poruchy, protože s rostoucí vzdáleností roste impedance vedení. [7] [10]

Výhodou použití odporu je tlumení přepětí, nevýhodou pak je nutnost vypnutí vedení při zemním spojení. [11]

Aby došlo k tlumení přepětí, musí být jmenovitý proud rezistoru větší než kapacitní proud sítě. [9]

$$I_R \geq I_{\text{kap}} \quad (3.9)$$

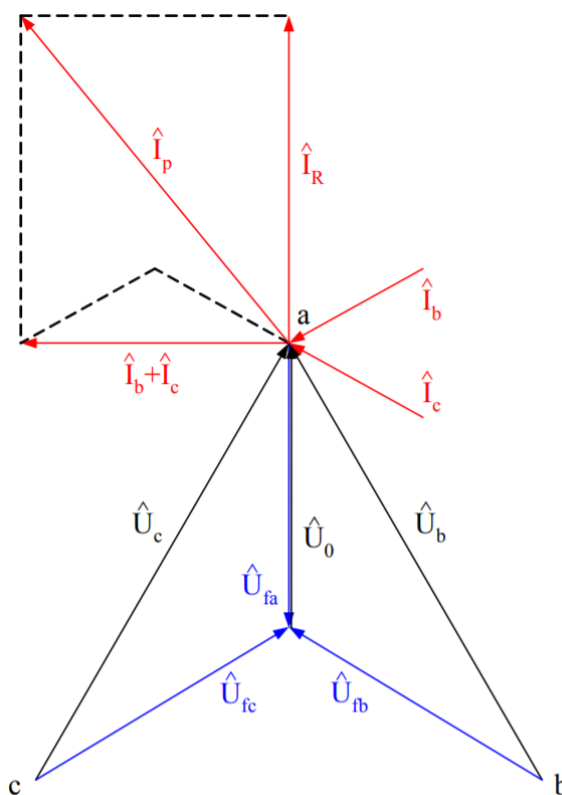
$$\frac{U_f}{R} \geq 3 \cdot \omega \cdot k_0 \cdot U_f \quad (3.10)$$

Odpor uzlového rezistoru bude:

$$R \leq \frac{1}{3 \cdot \omega \cdot k_0} \quad (3.11)$$

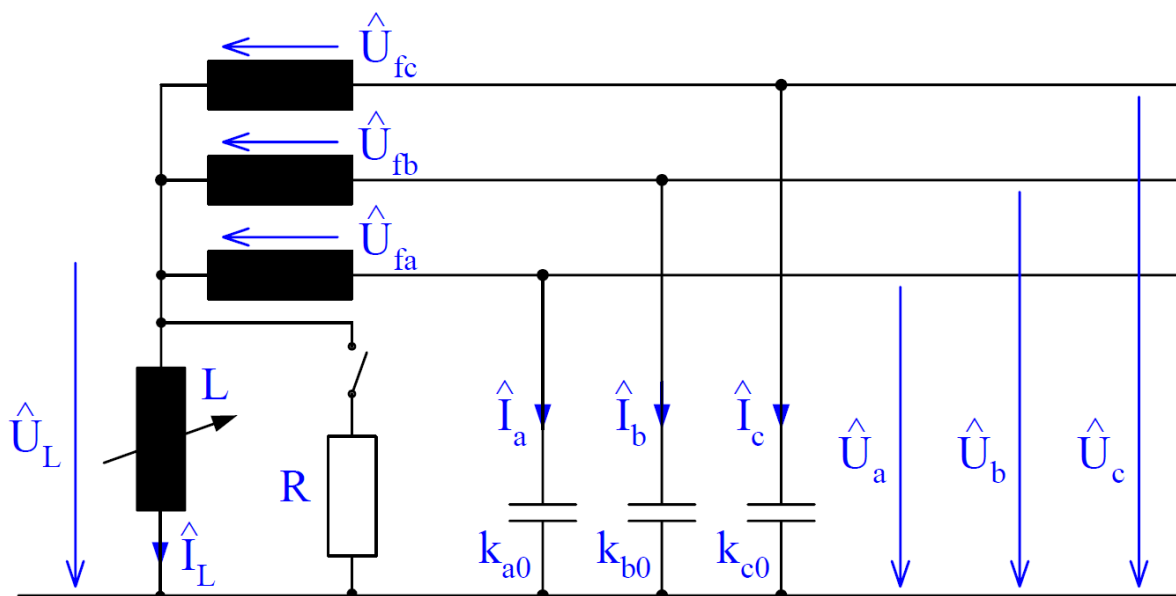
Maximální proud zemní poruchy:

$$\hat{I}_P = -\left(\frac{1}{R} + j3 \cdot \omega \cdot k_0\right) \cdot U_f = \hat{I}_R + \hat{I}_{kap} \quad (3.12)$$



Obr. 3.5 Fázorový diagram při zemní poruše v blízkosti transformátoru [9]

3.3 Sít' s přechodným uzemněním uzlu



Obr. 3.6 Schéma sítě s přechodným uzemněním uzlu [9]

V této síti se ke kompenzaci zemních kapacitních proudů používá zhášecí tlumivka, ke které se při trvalém zemním spojení paralelně připojí rezistor. Připojením rezistoru se zvětší poruchový proud a díky tomu se zlepší podmínky pro činnost zemních ochran.

Proud tekoucí rezistorem má být větší než kapacitní proud sítě

$$I_R \geq I_{\text{kap}} \quad (3.13)$$

$$\frac{U_f}{R} \geq 3 \cdot \omega \cdot k_0 \cdot U_f \quad (3.14)$$

$$R \leq \frac{1}{3 \cdot \omega \cdot k_0} \quad (3.15)$$

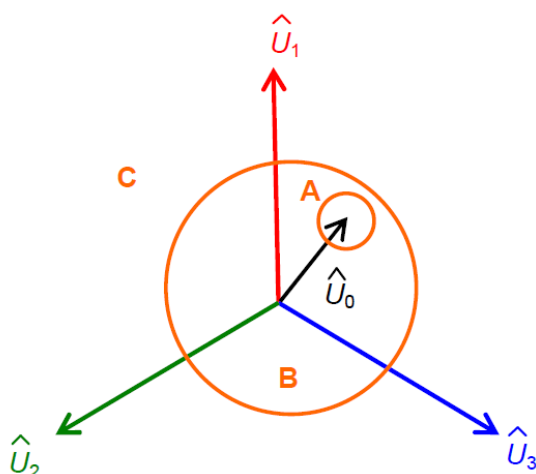
Rezistor se připojuje automaticky a to pouze při trvalém zemním spojení. Před připojením rezistoru je třeba vyčkat, jestli nedojde k zániku zemního spojení. Zvýšení napětí na měřicím vinutí zhášecí tlumivky nad nastavenou mez vyhodnocuje měřicí obvod automatiky jako zemní spojení. Časové zpoždění připojení rezistoru je nastavitelné od 0,5 s do 10 s, doba zapnutí rezistoru je nastavitelná v mezích od 1 s do 3 s. [9]

3.4 Švédská neutrála (Swedish neutral)

Jedná se o automatický ochranný systém, který se zapojuje do uzlu hvězdy napájecího vn transformátoru, a slouží pro indikaci a lokalizaci zemního spojení a kompenzaci poruchového proudu. Švédská neutrála používá metodu admitančního principu netočivé složky. Systém průběžně vypočítává admitanci všech fází a při vzniku zemního spojení určí porovnáním hodnot postiženou fázi. Ve zdravých fázích se admitance nemění.

Po určení postižené fáze dochází k automatickému doladění zhášecí tlumivky, dokud hodnota admitance postižené fáze není rovna admitanci před vznikem zemního spojení. Důsledkem doladění je snížení poruchového proudu, anebo může porucha sama odeznít. Snížením poruchového proudu se zvýší bezpečnost provozu i při trvajícím poruše a sníží se nebezpečné dotykové a krokové napětí v místě poruchy.

Předností švédské neutrály je rychlost odezvy na změnu kapacity sítě vysokého napětí při změnách konfigurace napájených oblastí. V České republice je tento systém provozován společností ČEZ a.s. v rozvodně Hodolany, Olomouc. [12] [13]



Obr. 3.7 Toleranční pole monitorování sítě systémem Swedish Neutral [15]

Oblast A – normální (bezporuchový) provoz

Oblast B – manipulace v síti např. změna zapojení

Oblast C – vznik zemního spojení

4. MOŽNOSTI LOKALIZACE MÍSTA ZEMNÍHO SPOJENÍ

Při zemním spojení dochází k:

- Snížení napětí postižené fáze dokonce až k nulové hodnotě
- Zvýšení napětí zdravých fází až na hodnotu sdruženého napětí
- Geometrický součet vektorů jednotlivých fází již nebude nulový a dojde ke vzniku napětí mezi uzlem transformátoru a země
- Výsledný součet vektorů proudů již nebude nulový a zemním vodičem poteče proud

Kompenzovanou síť je možné nechat při zemním spojení určitou dobu v provozu, než dojde k vypnutí postiženého úseku. Místo a vývod, kde došlo k zemnímu spojení, je třeba velmi rychle vyhledat. Vedení, které je nutné nechat v provozu i při zemním spojení, je přípustné provozovat do doby, kdy oteplení oleje tlumivky dosáhne mezní hodnoty. Pokud by hrozilo překročení mezní teploty, pak je třeba postižený úsek vypnout.

Doba provozu sítě se zemním by měla být co nejkratší, aby se zabránilo v okolí poruchy ohrožení zdraví osob, a zároveň vzniku následných poruch.

U kabelových sítí je vadný kabel nutné rychle odpojit od napájení pomocí zemních činných relé, protože může dojít ke zvětšení poruchy i ke zkratu.

Ochrany používané v rozvodnách jsou schopny indikovat zemní spojení a určit vývod se zemním spojením, ale už nejsou schopny určit přesné místo zemního spojení. [15]

Dělení metod pro lokalizaci místa zemního spojení:

Aktivní metody

Využívají pomocný signál se specifickou frekvencí. V případě poruchy se jeho vyhledáním lokalizuje místo poruchy.

Pasivní metody

Vychází ze sledování napěťových a proudových poměrů. Nepoužívají žádný pomocný signál. [14]

4.1 Lokalizace místa zemního spojení postupným vypínáním úseků

Snahou je postupným vypínáním jednotlivých úseků vedení docílit co nejmenšího úseku, ve kterém se nachází zemní spojení, které je následovně vypnuto. Tento způsob lokalizace se provádí pomocí dálkově ovládaných a řízených úsečnickových odpojovačů. Je možné ho použít v malých rozvodnách a středně velkých transformátorovnách, kde při vypnutí nedojde k přerušení dodávek elektrické energie a tím ke ztrátám ve výrobě.

Při spínacích procesech mohou v síti vzniknout nebezpečné přepětí, které mohou způsobit mechanické a tepelné namáhání vedení a opětovný vznik zemního spojení. Tento způsob lokalizace je zdoluhavý a ekonomicky nákladný.

4.2 Lokalizace zemního spojení užitím indikátorů

Na vybrané sloupky podél vedení se umístí indikátory.

4.3 Lokalizace zemního spojení kontrolou údržby

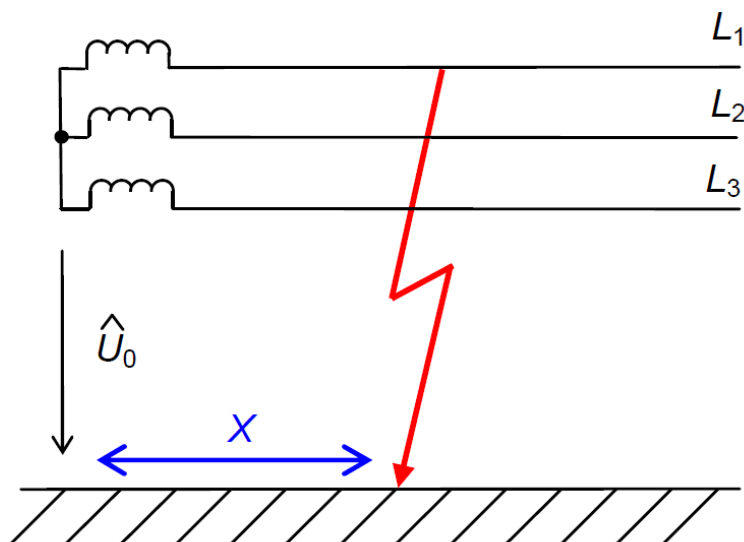
Nejdříve je potřeba lokalizovat místo zemního spojení. Poté se na toto místo vyše údržbář, který provede vizuální kontrolu vedení, které mohlo být porušeno např. spadlým stromem.

4.4 Lokalizace zemního spojení pomocí zkruhování sítě

Vedení s poruchou se spojí do „kruhu“ s vedením bez poruchy. Místo vzniku zemního spojení od rozvodny je dáno poměrem admitancí obou vývodů. V některých případech nelze tento způsob lokalizace použít, protože nelze zkruhovat zdravý vývod s vývodem se zemním spojením.

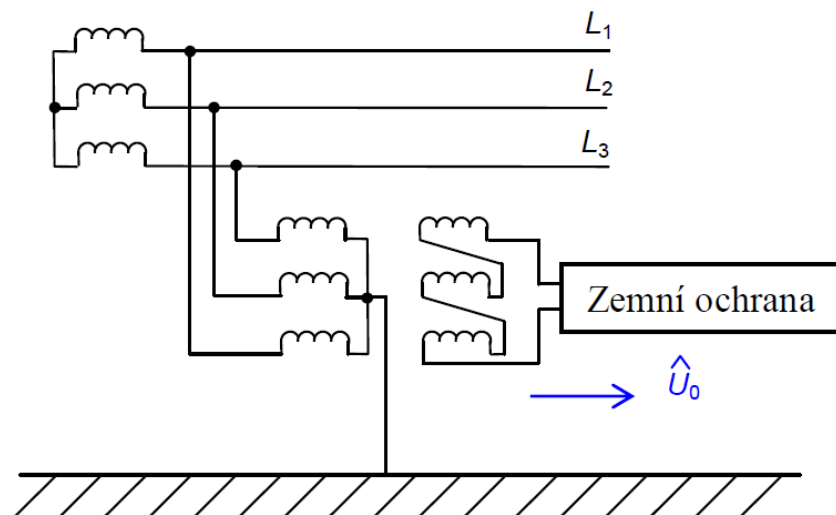
4.5 Lokalizace místa zemního spojení s využitím napěťového kritéria

Napěťová ochrana měří napětí uzlu proti zemi, které je při normálním provozu téměř nulové. Při vzniku zemního spojení toto napětí vzroste a je úměrné vzdálenosti x zemního spojení od uzlu transformátoru.



Obr. 4.1 Napětí na uzlu transformátoru při zemním spojení [15]

Ochrana je umístěna v uzlu transformátoru kde měří napětí U_0 mezi uzlem transformátoru a zemí. Pro měření využívá přístrojový transformátor napětí. Jestliže není k dispozici přístrojový transformátor napětí v uzlu, pak je možno využít zapojení tří přístrojových transformátorů napětí v zapojení do otevřeného trojúhelníku. Nesmí se zapomenout uzemnit uzel vstupní hvězdy těchto transformátorů.



Obr. 4.2 Připojení ochrany na otevřený trojúhelník [15]

Tam, kde není možné pouhým odpojením postižené části udržet celou postiženou síť v chodu a je nutné její vypnutí, postačí použít tento způsob napěťové ochrany. Například se může jednat o alternátor pracující v bloku s transformátorem, kde strana vn tvoří nedílný celek.

Napětí mezi uzlem transformátoru a zemí U_0 obsahuje řadu vyšších harmonických, které mohou ovlivnit funkci této ochrany. Měřicí transformátory jsou konstruovány tak, že je umí potlačit.

4.6 Lokalizace místa zemního spojení s využitím proudového kritéria

Při využití proudového kritéria je třeba nejprve vypočítat zemní kapacitní proudy chráněného vývodu I_{CV} a okolní připojené sítě I_{CS} .

Kapacitní proud sítě

$$I_{CS} = 3 \cdot \omega \cdot C_{0S} \cdot U_f \quad (4.1)$$

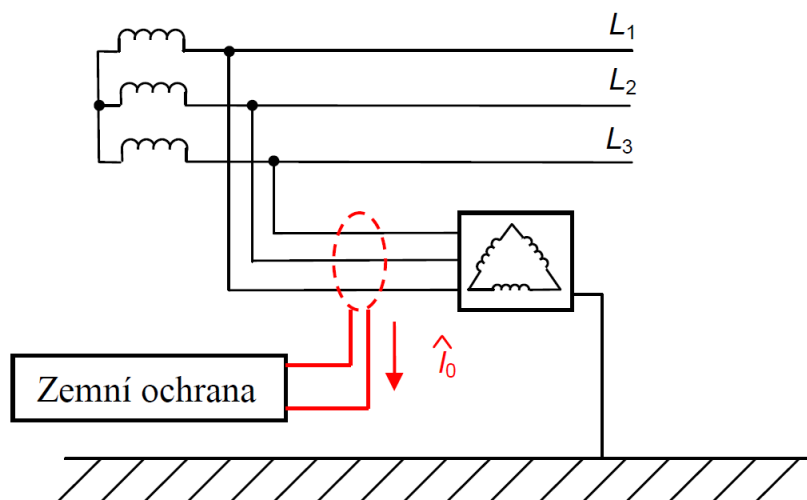
Kapacitní proud chráněného vývodu

$$I_{CV} = 3 \cdot \omega \cdot C_{0V} \cdot U_f \quad (4.2)$$

Pro lokalizaci místa zemního rozlišujeme dva případy:

$$I_{CS} \gg I_{CV}$$

V tomto případě je kapacitní proud sítě mnohonásobně vyšší než kapacitní proud chráněného vývodu a je vhodné použít ochranu na obrázku 4.3.



Obr. 4.3 Zemní ochrana sítě s izolovaným bodem se zemním proudem $I_{CS} \gg I_{CV}$ [15]

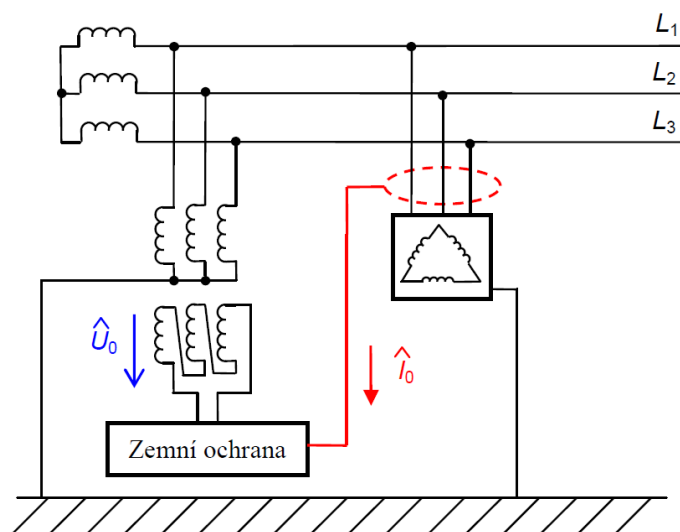
V případě, že dojde ke vzniku zemního spojení, tak prochází v místě ochrany a chráněném vývodu nulová složka kapacitního proudu sítě I_{CS} a z vedení nulová složka kapacitního proudu vývodu I_{CV} . Proudovou ochranu je pak potřeba naladit právě mezi tyto dva proudy.

$$I_{CV} < I_C < I_{CS}$$

Nulová složka zemního kapacitního proudu I_0 se získá z průvlekového transformátoru proudu.

$$I_{CS} \approx I_{CV}$$

V tomto případě jsou velikosti kapacitního proudu sítě a kapacitního proudu chráněného vývodu srovnatelné. Zapojení ochrany na obrázku 4.4 použijeme, pokud velikost kapacitního proudu I_{KAP} není postačujícím kritériem pro lokalizaci místa zemního spojení.

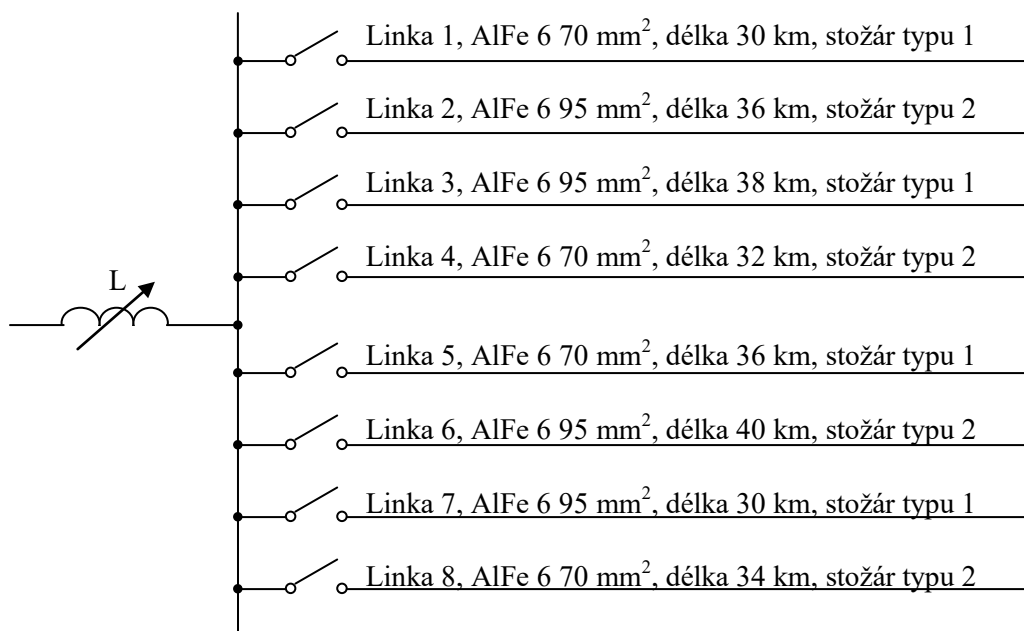


Obr. 4.4 Zemní ochrana sítě s izolovaným bodem se zemním proudem $I_{CS} \approx I_{CV}$ [15]

Při vzniku zemního spojení se mění směr proudu podle toho, zda zemní spojení vzniklo na vývodu nebo v síti. V případě zemního spojení na vývodu je síť napájena kapacitní proudem z vývodu a naopak. Ochrana, působící jen při zemním spojení uvnitř vývodu, pak zjišťuje směr toku energie v poškozeném obvodu. Nulovou složku proudu je možné měřit průvlekovým přístrojovým transformátorem proudu, nebo skupinou tří přístrojových transformátorů proudu. [15]

5. NÁVRH KOMPENZAČNÍ TLUMIVKY

Navrhnete zhašecí tlumivku pro kompenzaci zemního spojení. Určete potřebnou indukčnost pro 6 a 8 linek vedení vn.



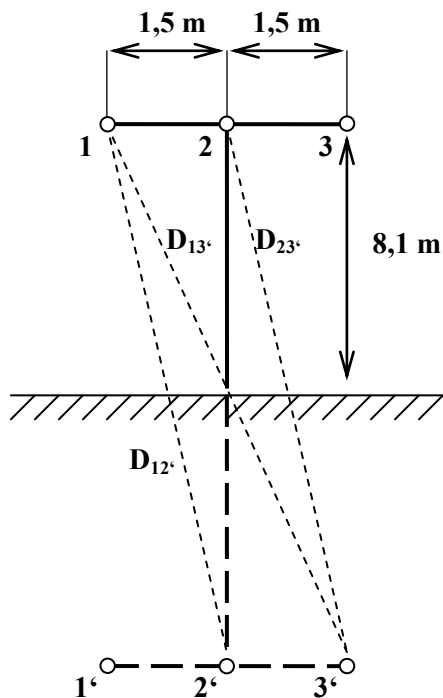
Obr. 5.1 Schéma zapojení

Lana:

AlFe 6 70 mm², $d_1 = 11,25$ mm, $r_1 = 5,625$ mm

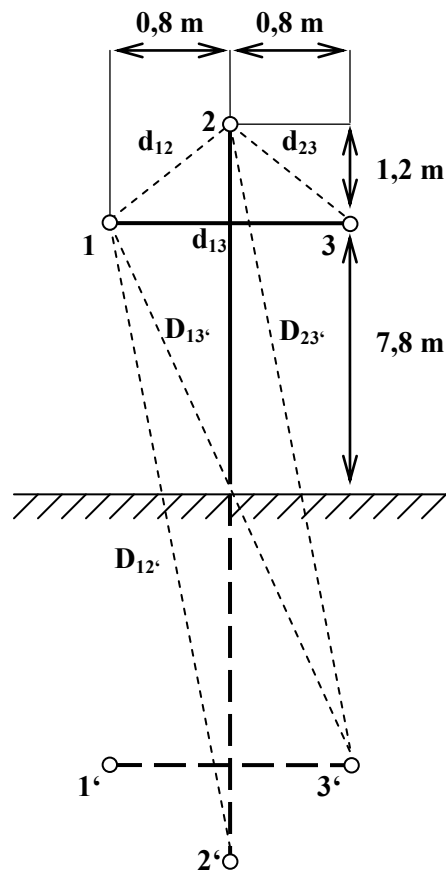
AlFe 6 95 mm², $d_2 = 13,5$ mm, $r_2 = 6,75$ mm

Stožár typu 1



Obr. 5.2 Stožár typu 1

Stožár typu 2



Obr. 5.3 Stožár typu 2

Stožár typu 1

$$d_{12} = 1,5 \text{ m}$$

$$d_{23} = 1,5 \text{ m}$$

$$d_{13} = d_{12} + d_{23} = 1,5 + 1,5 = 3 \text{ m} \quad (5.1)$$

Střední vzdálenost vodičů

$$d_S = \sqrt[3]{d_{12} \cdot d_{23} \cdot d_{13}} = \sqrt[3]{1,5 \cdot 1,5 \cdot 3} = 1,89 \text{ m} \quad (5.2)$$

$$D_{12}' = \sqrt{16,2^2 \cdot 1,5^2} = 16,27 \text{ m} \quad (5.3)$$

$$D_{23}' = \sqrt{16,2^2 \cdot 1,5^2} = 16,27 \text{ m} \quad (5.4)$$

$$D_{13}' = \sqrt{16,2^2 \cdot 3^2} = 16,48 \text{ m} \quad (5.5)$$

Střední vzdálenost od obrazu

$$D_S = \sqrt[3]{D_{12}' \cdot D_{23}' \cdot D_{13}'} = \sqrt[3]{16,27 \cdot 16,27 \cdot 16,48} = 16,34 \text{ m} \quad (5.6)$$

$$a = 8,1 \text{ m}$$

$$b = 8,1 \text{ m}$$

$$c = 8,1 \text{ m}$$

Střední vzdálenost od země

$$m = \sqrt[3]{a \cdot b \cdot c} = \sqrt[3]{8,1 \cdot 8,1 \cdot 8,1} = 8,1 \text{ m} \quad (5.7)$$

Kapacity na kilometr délky

$$C_{k1} = \frac{0,0242}{\log\left(\frac{d_S \cdot 2 \cdot m}{r_1 \cdot D_S}\right)} = \frac{0,0242}{\log\left(\frac{1,89}{5,625 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{2 \cdot 8,1}{16,34}\right)} = 9,59 \cdot 10^{-3} \text{ } \mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1} \quad (5.8)$$

$$C_{k3} = \frac{0,0242}{\log\left(\frac{d_S \cdot 2 \cdot m}{r_2 \cdot D_S}\right)} = \frac{0,0242}{\log\left(\frac{1,89}{6,75 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{2 \cdot 8,1}{16,34}\right)} = 9,90 \cdot 10^{-3} \text{ } \mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1} \quad (5.9)$$

$$C_{k5} = \frac{0,0242}{\log\left(\frac{d_S \cdot 2 \cdot m}{r_1 \cdot D_S}\right)} = \frac{0,0242}{\log\left(\frac{1,89}{5,625 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{2 \cdot 8,1}{16,34}\right)} = 9,59 \cdot 10^{-3} \text{ } \mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1} \quad (5.10)$$

$$C_{k7} = \frac{0,0242}{\log\left(\frac{d_S \cdot 2 \cdot m}{r_2 \cdot D_S}\right)} = \frac{0,0242}{\log\left(\frac{1,89}{6,75 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{2 \cdot 8,1}{16,34}\right)} = 9,90 \cdot 10^{-3} \text{ } \mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1} \quad (5.11)$$

Stožár typu 2

$$d_{12} = \sqrt{1,2^2 \cdot 0,8^2} = 1,44 \text{ m} \quad (5.12)$$

$$d_{23} = \sqrt{1,2^2 \cdot 0,8^2} = 1,44 \text{ m} \quad (5.13)$$

$$d_{13} = 0,8 + 0,8 = 1,6 \text{ m} \quad (5.14)$$

Střední vzdálenost vodičů

$$d_S = \sqrt[3]{d_{12} \cdot d_{23} \cdot d_{13}} = \sqrt[3]{1,44 \cdot 1,44 \cdot 1,6} = 1,49 \text{ m} \quad (5.15)$$

$$D_{12}' = \sqrt{16,8^2 \cdot 0,8^2} = 16,82 \text{ m} \quad (5.16)$$

$$D_{23'} = \sqrt{16,8^2 \cdot 0,8^2} = 16,82 \text{ m} \quad (5.17)$$

$$D_{13'} = \sqrt{15,6^2 \cdot 1,6^2} = 15,68 \text{ m} \quad (5.18)$$

Střední vzdálenost od obrazu

$$D_S = \sqrt[3]{D_{12'} \cdot D_{23'} \cdot D_{13'}} = \sqrt[3]{16,82 \cdot 16,82 \cdot 15,68} = 16,43 \text{ m} \quad (5.19)$$

$$a = 7,8 \text{ m}$$

$$b = 9 \text{ m}$$

$$c = 7,8 \text{ m}$$

Střední vzdálenost od země

$$m = \sqrt[3]{a \cdot b \cdot c} = \sqrt[3]{7,8 \cdot 9 \cdot 7,8} = 8,18 \text{ m} \quad (5.20)$$

Kapacity na kilometr délky

$$C_{k2} = \frac{0,0242}{\log\left(\frac{d_S \cdot 2 \cdot m}{r_2 \cdot D_S}\right)} = \frac{0,0242}{\log\left(\frac{1,49}{6,75 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{2 \cdot 8,18}{16,43}\right)} = 1,03 \cdot 10^{-2} \text{ } \mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1} \quad (5.21)$$

$$C_{k4} = \frac{0,0242}{\log\left(\frac{d_S \cdot 2 \cdot m}{r_1 \cdot D_S}\right)} = \frac{0,0242}{\log\left(\frac{1,49}{5,625 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{2 \cdot 8,18}{16,43}\right)} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ } \mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1} \quad (5.22)$$

$$C_{k6} = \frac{0,0242}{\log\left(\frac{d_S \cdot 2 \cdot m}{r_2 \cdot D_S}\right)} = \frac{0,0242}{\log\left(\frac{1,49}{6,75 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{2 \cdot 8,18}{16,43}\right)} = 1,03 \cdot 10^{-2} \text{ } \mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1} \quad (5.23)$$

$$C_{k8} = \frac{0,0242}{\log\left(\frac{d_S \cdot 2 \cdot m}{r_1 \cdot D_S}\right)} = \frac{0,0242}{\log\left(\frac{1,49}{5,625 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{2 \cdot 8,18}{16,43}\right)} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ } \mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1} \quad (5.24)$$

Celkové kapacity linek

$$C_1 = C_{k1} \cdot l_1 = 9,59 \cdot 10^{-3} \cdot 30 = 2,88 \cdot 10^{-1} \text{ } \mu\text{F} \quad (5.25)$$

$$C_2 = C_{k2} \cdot l_2 = 1,03 \cdot 10^{-2} \cdot 36 = 3,72 \cdot 10^{-1} \text{ } \mu\text{F} \quad (5.26)$$

$$C_3 = C_{k3} \cdot l_3 = 9,90 \cdot 10^{-3} \cdot 38 = 3,76 \cdot 10^{-1} \text{ } \mu\text{F} \quad (5.27)$$

$$C_4 = C_{k4} \cdot l_4 = 1 \cdot 10^{-2} \cdot 32 = 3,20 \cdot 10^{-1} \text{ } \mu\text{F} \quad (5.28)$$

$$C_5 = C_{k5} \cdot l_5 = 9,59 \cdot 10^{-3} \cdot 36 = 3,45 \cdot 10^{-1} \text{ } \mu\text{F} \quad (5.29)$$

$$C_6 = C_{k6} \cdot l_6 = 1,03 \cdot 10^{-2} \cdot 40 = 4,13 \cdot 10^{-1} \text{ } \mu\text{F} \quad (5.30)$$

$$C_7 = C_{k7} \cdot l_7 = 9,90 \cdot 10^{-3} \cdot 30 = 2,97 \cdot 10^{-1} \text{ } \mu\text{F} \quad (5.31)$$

$$C_8 = C_{k8} \cdot l_8 = 1 \cdot 10^{-2} \cdot 34 = 3,40 \cdot 10^{-1} \text{ } \mu\text{F} \quad (5.32)$$

Pro 6 linek

Celková kapacita

$$\begin{aligned}C_{\text{celková}} &= C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + C_6 = \\&= 2,88 \cdot 10^{-1} + 3,72 \cdot 10^{-1} + 3,76 \cdot 10^{-1} + 3,20 \cdot 10^{-1} + 3,45 \cdot 10^{-1} + 4,13 \cdot 10^{-1} = 2,11 \mu\text{F}\end{aligned}\tag{5.33}$$

Potřebná indukčnost zhášecí tlumivky

$$L = \frac{1}{3 \cdot \omega^2 \cdot C_{\text{celková}}} = \frac{1}{3 \cdot (2 \cdot \pi \cdot 50)^2 \cdot 2,11 \cdot 10^{-6}} = 1,6 \text{ H}\tag{5.34}$$

Pro 8 linek

Celková kapacita

$$\begin{aligned}C_{\text{celková}} &= C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + C_6 + C_7 + C_8 = \\&= 2,88 \cdot 10^{-1} + 3,72 \cdot 10^{-1} + 3,76 \cdot 10^{-1} + 3,20 \cdot 10^{-1} + 3,45 \cdot 10^{-1} + 4,13 \cdot 10^{-1} + \\&+ 2,97 \cdot 10^{-1} + 3,40 \cdot 10^{-1} = 2,75 \mu\text{F}\end{aligned}\tag{5.35}$$

Potřebná indukčnost zhášecí tlumivky

$$L = \frac{1}{3 \cdot \omega^2 \cdot C_{\text{celková}}} = \frac{1}{3 \cdot (2 \cdot \pi \cdot 50)^2 \cdot 2,75 \cdot 10^{-6}} = 1,23 \text{ H}\tag{5.36}$$

Indukčnost tlumivky je v rozsahu od 1,23 do 1,6 H.

ZÁVĚR

Cílem této práce bylo teoreticky popsat vznik zemního spojení, uvést některé ze způsobů kompenzace a lokalizace zemního spojení, a ukázat příklad návrhu kompenzační tlumivky.

První kapitola se nejdříve zabývá popisem základních parametrů vedení, mezi které patří odpor, indukčnost, kapacita a svod, a rozdělením napěťových hladin do skupin od malého napětí až do ultra vysokého napětí. Následuje popis venkovního a kabelového vedení. Oba dva typy vedení mají své výhody a nevýhody, např. venkovní vedení je oproti kabelovému jednodušší na údržbu, kabelové není zase tolik náchylné na povětrnostní vlivy. V předposlední části první kapitoly jsou uvedeny typy rozvodných sítí. Konkrétně v síti IT dochází k zemnímu spojení. Typy rozvodných sítí jsem krátce popsal a doplnil obrázky. Poslední část se zabývá materiály používané na vodiče, jako jsou hliník, měď, slitiny, ocel jako nosná část lana, bronz pro speciální účely.

Druhá kapitola se věnuje vzniku zemního spojení. Uvedl jsem zde rozdíl mezi jednofázovým zkratem a zemním spojením z hlediska velikosti a charakteru poruchového proudu. Následuje rozdělení podle velikosti přechodového odporu v místě zemního spojení na odporové, obloukové a kovové a podle doby trvání zemního spojení na mžiková, krátkodobá, trvalá a přerušovaná. Poslední částí této kapitoly je pak podrobnější popsání trvalého a přerušovaného zemního spojení.

Ve třetí kapitole jsou uvedeny způsoby kompenzace zemního spojení. Kompenzujeme z toho důvodu, abychom udrželi síť v provozu i se zemním spojením. Nejpoužívanější způsob kompenzace je pomocí zhášecí tlumivky. Použití tlumivky je ale problematické v rozlehlých kabelových sítích, proto se v těchto sítích používá rezistor. Další možností je kompenzace pomocí tlumivky, ke které se připne paralelně rezistor při trvajícím zemním spojení, nebo švédské neutrály, automatického ochranného systému prozatím v České republice velmi málo rozšířeného.

Čtvrtá kapitola pojednává o možnostech lokalizace zemních spojení. V rozlehlé síti je třeba místo zemního spojení přesně lokalizovat, postižený úsek vedení odpojit a poruchu následně rychle odstranit, aby se zabránilo ohrožení osob a větším škodám na vedení. Mezi způsoby lokalizace místa zemního spojení patří například postupné odpojování úseků, zkruhování sítě, využití napěťového kritéria.

V závěrečné páté kapitole je uveden návrh laditelné kompenzační tlumivky. Na začátek jsem si zvolil dva typy stožárů, lan AlFe a délky jednotlivých linek. Z celkových kapacit pro 6 a 8 linek vedení vn byly vypočteny indukčnosti tlumivky.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] MACH, Veleslav. *Technika vysokého napětí. 2.*, přeprac. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2006. ISBN 80-248-1161-8.
- [2] SANTARIUS, Pavel. *Elektrické stanice a vedení*. Ostrava: Vysoká škola báňská, 1990. ISBN 80-7078-032-0.
- [3] HODINKA, Miloslav, Štefan FECKO a František NĚMEČEK. *Přenos a rozvod elektrické energie*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1989. ISBN 80-03-00065-3.
- [4] DRÁPALA, Jaromír a Miroslav KURSA. *Elektrotechnické materiály: učební text*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2012. ISBN 978-80-248-2570-0.
- [5] MUDRUŇKOVÁ, Anna. *Elektroenergetika I* [online]. 2016 [cit. 2018-04-19]. ISBN 978-80-88058-81-6. Dostupné z: <https://publi.cz/books/260/Impresum.html>
- [6] TROJÁNEK, Zdeněk, Josef HÁJEK a Pavol KVASNICA. *Přechodné jevy v elektrizačních soustavách*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1987.
- [7] FEJT, Zdeněk, ČERMÁK, Jaroslav, ed. *Elektroenergetika*. Praha: České vysoké učení technické, 1981.
- [8] *Přenos a rozvod elektrické energie: Parametry vedení* [online]. Ostrava [cit. 2018-04-21]. Dostupné z: http://fei1.vsb.cz/kat410/studium/f_studium.htm
- [9] *Zemní spojení v trojfázových soustavách* [online]. [cit. 2018-04-19]. Dostupné z: <http://www.powerwiki.cz/attach/ES/ZemniSpojeni.pdf>
- [10] TOMAN, Petr. *Provoz distribučních soustav*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04935-8.
- [11] ORSÁGOVÁ, Jaroslava. *Rozvodná zařízení* [online]. 1. Brno, 2015 [cit. 2018-04-19]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/16989703-Rozvodna-zarizeni-autor-textu-ing-jaroslava-orsagova.html>
- [12] Pernica, Drahomír: *Nekontaktní indikátory poruchových stavů na VN vedení*. Brno, 2011. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta Elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [13] MAJER, Michal. *Systémy s uzemňováním fáze se zemní poruchou* [online]. Plzeň, 2014 [cit. 2018-04-19]. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/14199/1/bakalarka.pdf>. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni.

- [14] SNIEGOŇ, Tomáš. *Identifikace a lokalizace zemního spojení v sítích IT/500V* [online]. Ostrava, 2013 [cit. 2018-04-19]. Dostupné z:
https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/100571/SNI003_FEI_P2649_3907V001_2013.pdf?sequence=1&isAllowed=n. Dizertační práce. VŠB-TU.
- [15] RICHTER, Pavel, *Vybrané diagnostické metody lokalizace zemního spojení v sítích VN*. Ostrava, 2010. Diplomová práce. VŠB-TU